



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Электрооборудование летательных аппаратов

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электропривод для системы ориентации космического аппарата

УДК 629.78.062.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Минишина Елизавета Евгеньевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ, ИШЭ	Киселев Александр Викторович	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОЭЭ ИШЭ				

Томск – 2020г.

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные</i>	
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.</i>
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<i>Универсальные</i>	
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Электрооборудование летательных аппаратов

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Минишиной Елизавете Евгеньевне

Тема работы:

Электропривод для системы ориентации космического аппарата	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 45-39/с от 14.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<p>Объект разработки – электропривод для системы ориентации космического аппарата. Требования к электродвигателю-маховику:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Кинетический момент 0,25 Нмс; • Угловая скорость 12000 об/мин; • Потребляемая мощность не более 10 Вт.
---	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Аналитический обзор по литературным источникам; 2. Расчетно-конструкторская модель; 3. Выбор материалов 4. Расчет рабочих характеристик; 5. Рабочая диаграмма магнита; 6. Финансовый менеджмент; 7. Социальная ответственность; 8. Заключение.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Паз якоря; 2. Обмотка якоря; 3. Сборочный чертеж исполнительного органа.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, энергосбережение»	Спицына Любовь Юрьевна
«Социальная ответственность»	Мезенцева Ирина Леонидовна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Киселев Александр Викторович	к.т.н. доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Минишина Елизавета Евгеньевна		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) Электрооборудование летательных аппаратов

Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврской работы

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2020	<i>Введение</i>	
15.03.2020	<i>Аналитический литературный обзор</i>	
30.04.2020	<i>Расчетно-конструкторская модель;</i>	
1.05.2020	<i>Выбор материалов</i>	
15.05.2020	<i>Расчет рабочих характеристик;</i>	
22.05.2020	<i>Рабочая диаграмма магнита;</i>	
02.06.2020	<i>Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	
27.05.2020	<i>Социальная ответственность</i>	
30.05.2020	<i>Заключение</i>	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Киселев Александр Викторович	к.т.н. доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Минишиной Елизавете Евгеньевной

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	ЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника/ЭОЛА

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта не более 250000 рублей, в том числе затраты на оплату труда не более 150000 рублей.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Положения об оплате труда в ТПУ. Прайс-листы канцелярских товаров и услуг.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Премимальный коэффициент, районный коэффициент, коэффициент доплат и надбавок, заработная плата по тарифной ставке.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка потенциала и перспективности реализации НИ можно оценить с помощью SWOT-анализа и интегральной оценки ресурсоэффективности
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Расчет основной заработной платы, баланс рабочего времени, общая стоимость оборудования и материалов, отчисления во внебюджетные фонды
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности технического проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений;
2. Матрица SWOT;
3. Альтернативы проведения НИ;
4. График проведения и бюджет НИ;
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	1.04.2020
--	-----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Минишина Елизавета Евгеньевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Минишиной Елизавете Евгеньевне

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника/ЭОЛА

Тема ВКР:

Электропривод для системы ориентации космического аппарата	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объектом исследования является бесконтактный двигатель постоянного тока на основе постоянных магнитов, применяемый в области космонавтики для систем ориентации КА</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – СанПиН 2.2.4.548-96 – ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ – СН 2.2.4/2.1.8.566–96 – ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ – ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<i>В данной части необходимо проанализировать следующие вредные и опасные факторы: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, повышенный уровень вибрации, недостаточный уровень освещенности, электрический ток, движущиеся механизмы.</i>
3. Экологическая безопасность:	<i>Утилизация отходов производства и потребления (источники отходов в околоземном пространстве)</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Возможная ЧС: пожар по причине короткого замыкания.</i>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Минишина Елизавета Евгеньевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 84 листов, 16 рисунков, использовано 28 источников.

Ключевые слова: система ориентации космического аппарата, исполнительный орган, двигатель-маховик, кинетический момент, момент инерции, бесконтактный двигатель постоянного тока, постоянные магниты.

Объектом исследования является электропривод системы ориентации космического аппарата.

Целью работы является проектирование электропривода для системы ориентации космического аппарата, выбор обмоточных данных и материалов, расчет габаритных размеров маховика, разработка эскизных чертежей двигателя. Расчет затрат на проектирование двигателя и анализ вредных и опасных факторов.

В ходе работы решаются задачи: анализ различных видов систем ориентации космических аппаратов, обзор исполнительных органов; электромагнитный расчет; расчет параметров электропривода, расчет рабочих характеристик; расчет рабочей диаграммы постоянного магнита.

В ходе проектирования двигателя расчеты выполнялись в среде математического моделирования MathCad 15, разработка графических материалов производилась в программе Компас. Результатами работы являются рабочие характеристики двигателя, его эскиз.

Степень внедрения: ВКР выполнено по заданию отделения «Электроэнергетики и электротехники».

Область применения: система ориентации космического аппарата.

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ	10
ОГЛАВЛЕНИЕ	11
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	13
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	14
ВВЕДЕНИЕ	15
1. СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	16
1.1. Назначение и состав системы ориентации космического аппарата	16
1.2. Исполнительные органы системы ориентации	20
1.3. Электропривод системы ориентации КА	21
1.4. Конструкция и принцип действия БДПТ	22
2. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ-МАХОВИК	24
2.1. Маховик	24
2.2. Электропривод двигателя-маховика	25
2.3. Выбор магнитов	26
3. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	28
3.1. Расчет параметров маховика	28
3.2. Расчет БДПТ	30
3.2.1. Определение основных размеров БДПТ	30
3.2.2. Обмотка якоря	33
3.2.3. Пазово-зубцовая зона и спинка якоря	34
3.2.4. Параметры обмотки якоря и выбор коммутирующих элементов	36
3.2.5. Расчет магнитной цепи	40
3.2.6. Расчет индуктора	43
3.3. Рабочие характеристики БДПТ	44
4. РАБОЧАЯ ДИАГРАММА МАГНИТА	47
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	49
5.1. Потенциальные потребители результатов исследования	49
5.2. Анализ рынка и оценка конкурентоспособности продукции	50
5.3. Технология QuaD	52
5.4. SWOT-анализ работы магнитоэлектрического двигателя	53
5.5. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	56
5.6. Планирование научно-исследовательских работ	57
5.6.1. Структура работ в рамках технического проектирования	57
5.6.2. Определение трудоемкости выполнения ТП	58
5.6.3. Разработка графика проведения технического проекта	59
5.6.4. Смета затрат на проект	59
5.7. Формирование смет затрат технического проекта	64
5.8. Определение ресурсоэффективности проекта	64

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	67
Введение.....	67
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	67
6.2. Производственная безопасность	68
6.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов	69
6.4. Мероприятия по снижению уровня воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего).....	75
6.5. Экологическая безопасность	76
6.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	80

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БД – бесколлекторный двигатель;
БДПТ – бесконтактный двигатель постоянного тока;
ДПР – датчик положения ротора;
ДПТ – двигатель постоянного тока;
ИО – исполнительный орган;
КА – космический аппарат;
КПД – коэффициент полезного действия;
МДС – магнитодвижущая сила;
ПМ – постоянные магниты;
ТЗ – техническое задание;
УДМ – управляющий двигатель маховик;
ЭД – электродвигатель;
ЭДС – электродвижущая сила;
ЭМ – электрическая машина;
ЭМИО – электромеханический исполнительный орган;
ЭП – электропривод;
ЭС – электротехническая сталь;

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При написании выпускной квалификационной работы использовалась различная научно-техническая литература: учебные пособия, статьи и справочные материалы.

Учебное пособие «Системы управления космическими аппаратами (Исполнительные органы: назначение, принцип действия, схемы, конструкция) Г. Н. Гладышев, В. С. Дмитриев, В. И. Копытов показывает физические принципы генерирования управляющих моментов электромеханическими исполнительными органами на основе силовых гироскопов и управляемых по скорости двигателей-маховиков, рассмотрены технические решения и вопросы применения различных конструкционных материалов для повышенных эксплуатационных требований. Даны общие сведения по принципу действия электромеханических исполнительных органов и по вопросам проектирования.

В учебном пособии «Расчет микромашин постоянного тока с постоянными магнитами» В. А. Лифанов, Г. Н. Мармелев, рассматриваются различные конструкции машин с постоянными магнитами, также имеются рекомендации по их выбору. Важной частью этого пособия является общие вопросы и традиционная методика расчёта электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов с некоторыми уточнениями. По данному учебному пособию был произведен анализ основных конструкций БДПТ, проведен расчет магнитной системы и рабочих характеристик.

Учебное пособие «Проектирование электрических машин» Копылова И.П. Клокова Б.К., Морозкина В.П., Токарева Б.Ф. посвящено проектированию электрических машин общепромышленного применения. Данное пособие использовалось для выбора материалов для различных частей конструкции БДПТ.

ВВЕДЕНИЕ

Первые в истории спутники в связи с ограниченным уровнем развития технической базы имели простое устройство и функции, связанные в основном с измерением параметров условий внутри аппарата. Рост технического прогресса способствовал расширению и углублению космических исследований, что вызывало необходимость развития систем ориентации.

Процесс изучения космического пространства непрерывно связан с совершенствованием как систем ориентации в целом, так и исполнительных органов, как элементов этих систем. Наибольший акцент делается на улучшение электропривода.

Целью данной работы является проектирование электродвигателя-маховика системы ориентации КА на базе БДПТ с постоянными магнитами. В техническом задании представлены технические характеристики исполнительного органа. Для достижения данных требований в работе произведен расчет массогабаритных параметров маховика, параметры бесконтактного двигателя постоянного тока, его рабочие характеристики, а также рабочая диаграмма магнита.

Целесообразность технического проекта обосновывается в экономической части, где анализируются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования.

В разделе социальная ответственность анализируются опасные и вредные факторы, затрагиваются вопросы техники безопасности, производственной санитарии, а также уделяется внимание охране окружающей среды.

1. СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

1.1. Назначение и состав системы ориентации космического аппарата

Космический аппарат (КА) представляет собой комплекс различных технических устройств, предназначенных для работы в космическом пространстве. Для обеспечения эффективной работы и качественного функционирования элементов КА (например, максимальная освещенность солнечных батарей, наведение остронаправленных антенн) необходима правильная ориентация корпуса КА. Эту задачу выполняет система ориентации, путем компенсации возмущений, действующих на аппарат в полете, а также программное наведение.

Основная задача ориентирования подразделяется на следующие подзадачи:

1. обеспечение электроэнергии бортовой аппаратуры;
2. обеспечение связи;
3. обеспечение задач навигации;
4. обеспечение научных исследований;
5. обеспечение решений задач народного хозяйства.

Для решения перечисленных выше задач выделяют два направления: управление движением центра масс и управление движением относительно центра масс (Рисунок 1.1).

Необходимую величину управляющих воздействий для вывода КА в расчетную точку пространства с определённой скоростью в заданный момент времени обеспечивает управление движением центра масс.

Требуемое угловое движение КА относительно его центра масс создают управляющие воздействия определенной величины и направления, обеспеченные управлением движения относительно центра масс.

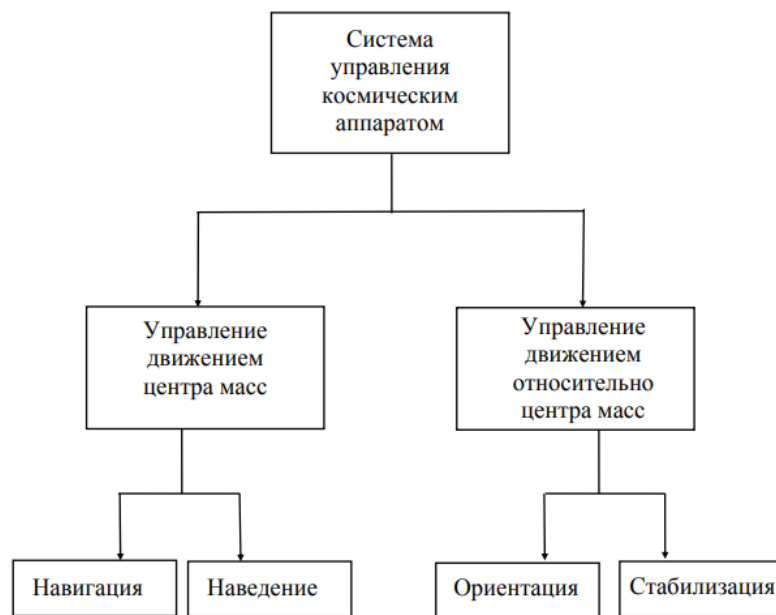


Рисунок 1.1 – Основные направления системы управления КА

Системы ориентации можно разделить на два типа, которые характеризуют степень выполняемых функций:

- одноосные (ориентируют только одну ось КА, две другие остаются произвольными);
- трехосные (ориентация всех трех осей).

Системы можно разделить по способу приложения момента (Рисунок - 1.2):

- Активные – для получения управляющего момента рабочее тело отбрасывается реактивными двигателями или с помощью электрической энергии от бортовых источников;
- Пассивные – управляющий момент получают при взаимодействии КА с гравитационными и магнитными полями;
- Комбинированные – управляющий момент получают и с помощью внешних моментов, и от энергии бортовых источников.

Наиболее распространённой является активная система ориентации/стабилизации, так как они более эффективны при отражении внешних возмущений и более точны, но для их функционирования

необходимо затратить больше энергии. Для реализации этого типа систем могут использоваться реактивные двигатели или электромеханические системы.

Преимуществом пассивных систем является их крайняя простота, отсутствие исполнительных органов для создания управляющих моментов. Существенным недостатком таких систем является то, что они способны только поддерживать некоторый режим ориентации КА и не могут осуществлять управление.



Рисунок 1.2 - Классификация систем ориентации и стабилизации

Системы ориентации также классифицируют по точности ориентации: грубые, средние и точные. В грубых системах точность ориентации до 10° , в средних - единицы градусов, в точных - угловые минуты.

Существует ряд других признаков, по которым возможно классифицировать системы ориентации. Однако из отмеченного следует, что

одна и та же система ориентации по своим техническим характеристикам может быть отнесена к нескольким классам: автоматической, точной, активной и т.д. [8]

В настоящее время существует классическая структурная схема системы ориентации, которая может стать основой для многих разнообразных задач, решаемых системой ориентации (Рисунок - 1.3.). Благодаря такой структуре во многих режимы управления можно использовать одни и те же приборы.

Датчик формирует сигналы, показывающие положение космического аппарата относительно избранной системы координат. Этот сигнал поступает в блок логики, где производится его анализ, сравнение, необходимы математические операции и преобразование в вид, удобный для дальнейшего использования. На основе проведенного анализа вырабатывается решение о работе системы ориентации в последующие моменты времени. Кроме этих сигналов, в блок логики поступают команды от других бортовых систем, которые дополняют информацию, поступающую с датчиков. С блока логики преобразованные и усиленные сигналы поступают к ИО. В результате их работы к космическому аппарату прикладываются управляющие моменты, которые изменяют его угловое положение.



Рисунок 1.3 – Структурная схема системы ориентации

1.2. Исполнительные органы системы ориентации

В настоящее время в качестве исполнительных органов для ориентации, стабилизации движений космического аппарата наибольшее распространение получили управляющие двигатели-маховики, выполняющие функции силовых гироскопов при установке их в карданов подвес.

Двигатели-маховики и силовые гироскопы генерируют управляющие моменты путем изменения количества движения маховиков и гироскопов, имеющих вращающиеся маховые массы. В соответствии с законом изменения кинетического момента системы происходит приложение момента к корпусу космического аппарата

Большое распространение управляющих двигателей-маховиков связано с экономией, так как нет необходимости использовать топливо или газ. А также они обладают высокой точностью ориентации, надежностью, экологичностью и отсутствием каких-либо выбросов, которые препятствуют исправной работе бортового оптического оборудования.

Принцип работы управляющего двигателя-маховика заключается в генерации управляющих моментов путем изменения кинетического момента маховика. В соответствии с законом изменения кинетического момента системы происходит приложение момента к корпусу КА.

$$M = H \cdot \dot{\alpha},$$

где M - управляющий момент, H - кинетический момент, $\dot{\alpha}$ - угловое ускорение.

На значение управляющего момента влияют: момент инерции маховика, момент трения, скорость вращения и ряд других параметров.

УДМ находят свое применение на автоматических КА, таких как спутники для исследования природных ресурсов и спутники связи, а также на относительно легких орбитальных станциях. Маховичная система

ориентации применена на спутниках «Омега», «Метеор», «Ресурс», «Глонасс» и других [3, 4].

1.3. Электропривод системы ориентации КА

В настоящее время в связи с простотой управления и получения энергии вращение маховика осуществляется только электрическими двигателями. Широкий диапазон угловых скоростей дает хорошую регулировочную характеристику, тем самым обеспечивая качественное управление. Помимо этого, важными критериями также являются малые габариты и масса, малое потребление энергии, высокая надежность.

В связи с этим в настоящее время наибольшее применение находят бесконтактный двигатель постоянного тока и асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Главным минусом применения асинхронных является нелинейность моментно-скоростной характеристики. Они могут использоваться в электромеханических исполнительных органах только в комплекте со сложной аппаратурой, только тогда электропривод работает с высоким КПД и имеет низкий момент сопротивления. Но это усложняет устройство и повышает массу электропривода.

Бесконтактный двигатель постоянного тока имеет высокие рабочие характеристики, а также является одной из наилучших машин в диапазоне от малых до средних мощностей. При этом он имеет довольно простую конструкцию, а механические характеристики жесткие и довольно надежны. Высоких затрат энергии при пуске не требуется.

Достоинства БДПТ:

- Широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- Высокое быстродействие;
- Очень высокая точность положения;

- Недорогое техническое обслуживание;
- Взрывостойкий объект;
- Устойчивость к сильным перегрузкам;
- Не перегревается при длительной работе.

БДПТ имеет также некоторые недостатки:

- Сложность в управлении двигателем;
- Высокая стоимость постоянных магнитов в конструкции ротора.

Ротор, соединенный с маховиком, выполняет функцию маховой массы в БДПТ. Тормозные моменты стараются снизить максимально. Электродвигатель способен обеспечить реверсивное вращение ротора-маховика, а также его торможение. Вращающий (управляющий) момент может плавно меняться в соответствии с сигналом управления, который подается на вход двигателя-маховика.

Для обеспечения защиты электропривода от механических воздействий, радиационного излучения и воздействия температуры конструкции проектируются жесткими, закрываются кожухами. Для обеспечения качественной сварки швов и термической проводимости, корпус может покрываться золотом.

1.4. Конструкция и принцип действия БДПТ

БДПТ по принципу действия представляет собой машину постоянного тока, в которой ротор является индуктором, а якорная обмотка находится на статоре. Функцию коллекторного узла выполняет полупроводниковый коммутатор. Он питает якорные обмотки и изменяет положение ротора.

В результате реакции магнитных потоков от статора и ротора появляется момент. Ротор с постоянными магнитами изменяет свое положение под действием магнитного потока статора, стремясь к тому, чтобы их потоки совпадали по направлению. Максимальный момент

вращения соответствует положению электрического угла в диапазоне 90 ± 30 граудусов, который достигается с помощью датчиков положения на роторе.

Наибольшее распространение в БДПТ получили магнитные системы с внешним расположением якоря вращающимся индуктором. Но также возможны в специальных случаях конструкции БДПТ с неподвижным внутренним якорем и внешним вращающимся индуктором.

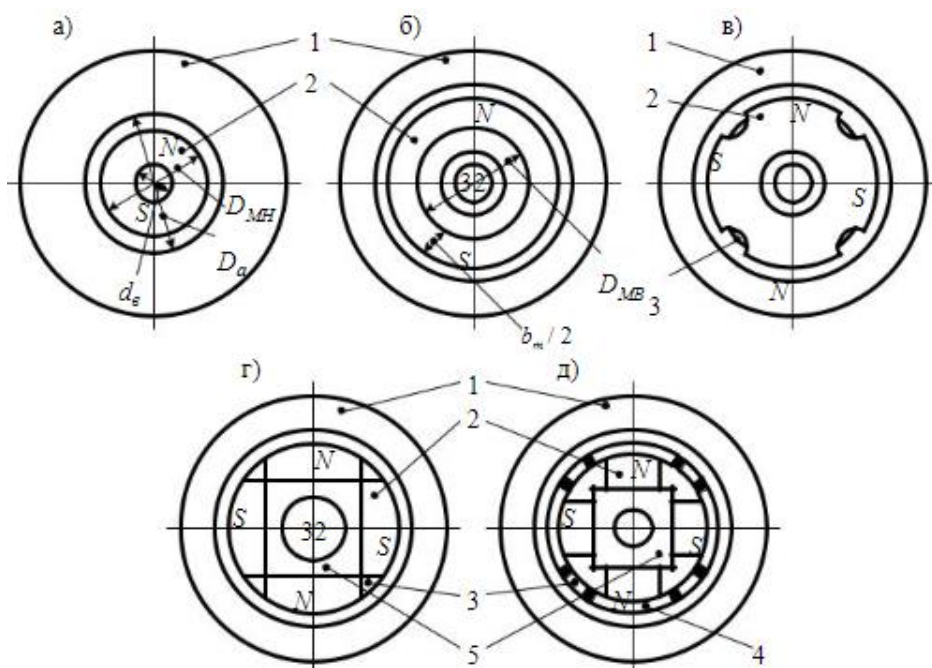


Рисунок 1.5 - Различные конструкции ротора БДПТ

Индуктор электрических машин с постоянными магнитами може иметь различную форму в зависимости от условий. Для машин мощностью до 50-60 Вт применяют цилиндрические магниты (Рисунок 1.5а). Также часто индуктор выполняется в виде звездочки с ярко выраженными полюсами безполюсных наконечников. Такой индуктор может быть как монолитный (Рисунок 1.5в), так и составным (Рисунок 1.5г). Возможно исполнение составного индуктора с призматическими постоянными магнитами (Рисунок 1.5д) [2].

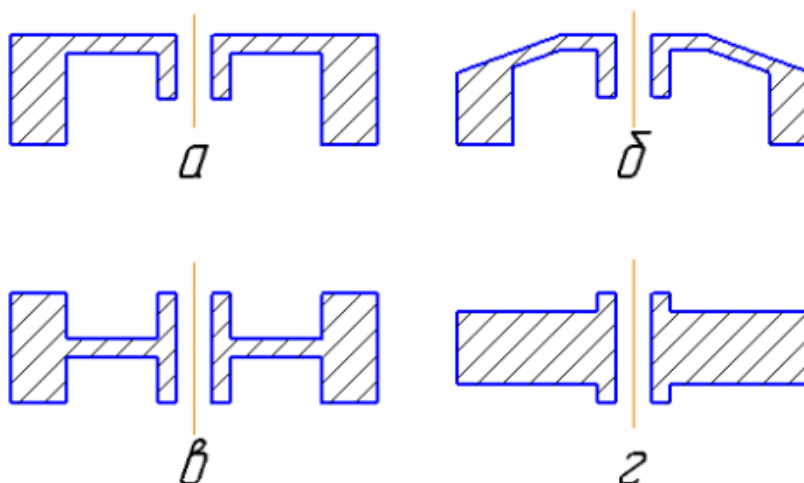
2. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ-МАХОВИК

2.1. Маховик

Требуемый кинетический момент равный $H=0,25$ Нмс создает маховик, который состоит из следующих частей:

1. Обод (вынесен на максимальный радиус);
2. Ступица (с помощью которой осуществляется посадка на вал);
3. Диафрагма (связывает обод и ступицу).

Маховики могут иметь разнообразную форму. Различные конструктивные формы представлены на рисунке 2.1.



Риснок 2.1 – Формы конструкции маховиков

Выбирая форму маховика рекомендуется соблюдать следующие требования [5]:

1. Оптимальное сочетание массы и размеров маховика для получения требуемого момента инерции;
2. Минимальные размеры двигателя-маховика;
3. Минимальные углы отклонения рамок подвеса;
4. Минимальный момент аэродинамический момент.

Самая эргономичная форма маховика под пунктом б. Эта форма позволит уменьшить габаритные размеры двигателя-маховика, следовательно конструкция двигателя-маховика станет более компактной.

2.2. Электропривод двигателя-маховика

Электропривод представляет собой функциональный узел, который состоит из:

1. Электродвигателя (ЭД) ;
2. Датчика положения ротора (ДПР).

В качестве электродвигателя используется бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Преимущества данного типа электродвигателя перечислены в главе 1.3.

Датчик положения ротора (ДПР) — элемент электропривода, позволяющий определить положение ротора электрической машины.

С помощью информации о положении ротора, полученной от ДПР, происходит управление электродвигателем и электрогенераторами [1].

Существуют различные виды ДПР:

- Магнитоиндукционный (т.е. в качестве датчика используются силовые катушки, а иногда дополнительные обмотки);
- Магнитоэлектрический (датчик Холла);
- Оптоэлектрический (светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор).

Преимуществами магнитоиндукционный ДПР является хорошее согласование со схемой коммутатора, обеспечивают необходимую выходную мощность и гальваническую развязку выходных сигналов, просты в изготовлении, обеспечивают работу в широком диапазоне изменения температур и давления, а также в условиях повышенной влажности.

Оптоэлектрический ДПР предпочтителен при необходимости обеспечения высокого быстродействия, малых размеров, хорошей

чувствительности к свету, минимальной чувствительности к изменению температуры. Но следует учитывать отрицательный фактор – ограничения по диапазону рабочих температур, времени работы и потреблению электрической энергии.

Магнитоэлектрический ДПР представляет собой датчик Холла. Постоянные магниты установленные на роторе создают магнитное поле, на которое реагирует датчик Холла. Датчики считывают угловую позицию вала и передают эту информацию схеме управления, которая обеспечивает своевременное отпирание и запирание силовых ключей электронного коммутатора обмоток статора.

2.3. Выбор магнитов

Постоянные магниты изготавливаются из магнитотвердых материалов с широкой петлей гистерезиса и малой магнитной проницаемостью. Основной характеристикой является кривая размагничивания, которая является частью петли гистерезиса, а именно во втором квадранте.

На данный момент наиболее широкое применение магнитоэлектрических двигателей нашли магниты сплавов Al-Ni-Co-Fe, Nd-Fe-B и Sm-Co. Ферритовые сплавы Fe-Ni, Fe-Ni-Co и бариевые ферриты широко использовались в отечественной промышленности. В авиационных и тракторных генераторах применяются до сих пор анизотропные сплавы, разработанные еще в 60-х годах - ЮНДК24, ЮНДК40Т8 и другие. Но в связи с развитием технологий и появления более современных сплавов высокоэнергетических магнитных материалов Nd-Fe-B, имеющих лучшие магнитные характеристики, анизотропные сплавы используются реже.

В этом техническом проекте было решено использовать магниты из сплава Sm-Co, так как условия эксплуатации электропривода системы ориентации являются крайне сложными. Магниты должны выдерживать как

экстремально низкие, так и экстремально высокие температуры, а также ионизирующее космическое излучение.

Благодаря редкоземельному металлу самарию, изделие обретает невероятную мощность. В определенных условиях работы магнит самариевый даже превосходит самые мощные неодимы. Магниты выпускают, исходя из двух основных химических формул — SmCo_5 и $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, они обладают высокими магнитными свойствами, сравнимой с неодимовыми магнитами. Имеют более высокую рабочую температуру, порядка 350°C . Самариевые магниты можно использовать в агрессивных коррозионных средах, а также Самарий-кобальтовые магниты обладают вибрационной, химической, магнитной и временной устойчивостью.

Данный вид магнитов нашел применение в космической отрасли, а в обычной промышленности чаще всего не используется. Благодаря своим преимуществам их используют в двигателях, различных сенсорах и других устройствах.

Преимущества:

- Температурный режим - от -60 до $+350^\circ\text{C}$, в этих пределах магнит не теряет своих магнитных свойств. Полная потеря магнитных свойств - примерно при 800°C ;
- Не подвержен коррозии и не нуждается в дополнительном покрытии;
- Сплав легок в обработке, легко придать любую форму.

Недостатки:

- Высокая стоимость за счет редкоземельных материалов — самария и кобальта, процесс очистки которых очень дорогостоящий;
- Очень хрупкие.

3. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Начальные данные для расчета:

1. Напряжение питания 27 В;
2. Потребляемая мощность не более 10 Вт;
3. Кинетический момент $H = 0,25$ Нмс;
4. Скорость вращения маховика 12000 об/мин.

3.1. Расчет параметров маховика

Данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Начальные данные для расчета параметров маховика

Начальные данные	
Кинетический момент, Нмс	0,25
Удельная масса, кг/м ³	7700
Скорость вращения маховика, об/ мин	12000
Скорость вращения маховика, рад/с	1256,64
Момент инерции, кг·м ²	0,00019894

Для расчета маховика необходимо первоначально определить момент инерции [6]:

$$J = \frac{H}{\Omega},$$

где H - кинетический момент, Ω - скорость вращения маховика.

$$J = \frac{0,25}{1256,64} = 0,0001989 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Материал маховика выбираем сталь Х12МФ.

Определим диаметр обода маховика по формуле:

$$D = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot J}{\pi \cdot \gamma \cdot h} \right)^{0,25} = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,0001989}{\pi \cdot 7700 \cdot 0,0074} \right)^{0,25} = 0,077 \text{ м},$$

где $\gamma = 7700 \text{ кг/м}^3$ удельная масса стали, J - момент инерции маховика, h - высота обода маховика.

Внутренний радиус маховика вычисляется по формуле:

$$r = R \cdot \sqrt[4]{1 - \frac{J}{0,5 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot h \cdot R^4}} = 0,039 \cdot \sqrt[4]{1 - \frac{0,00019894}{0,5 \cdot \pi \cdot 7700 \cdot 0,0074 \cdot 0,039^4}} = 0,029 \text{ м},$$

где R – наружный радиус маховика и равен $R = \frac{D}{2} = 0,039 \text{ м}$,

Толщина обода маховика:

$$R - r = 0,039 - 0,029 = 0,01 \text{ м},$$

Масса маховика может составлять половину от массы всей конструкции.

Рассчитаем массу маховика. Формула нахождения массы обода маховика:

$$m = \pi \cdot \gamma \cdot h \cdot (R^2 - r^2) = \pi \cdot 7700 \cdot 0,0074 \cdot (0,39^2 - 0,29^2) = 0,121 \text{ кг},$$

Основной прочностной характеристикой маховиков является механическая прочность обода маховика. Она определяется через угловую скорость и размеры маховика и описывается соотношением:

$$\sigma = \frac{\gamma \cdot \Omega^2 \cdot R^2}{g} = \frac{7700 \cdot 1256,64^2 \cdot 0,39^2}{9,8} = 1,85 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения.

Для используемого материала маховика (сталь Х12МФ) предел прочности составляет приблизительно 800 МПа, что значительно превосходит полученный результат. Это значит, что маховик удовлетворяет требованиям по прочности.

Таблица 2 - Параметры маховика

Параметр	Значение
Момент инерции J, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,00019894
Наружный радиус R, м	0,039
Внутренний радиус r, м	0,029
Высота обода h, м	0,0074
Масса маховика m, кг	0,121

3.2. Расчет БДПТ

В качестве материала магнита был выбран самарий кобальтовый сплав КС37 со следующими параметрами:

- Остаточная индукция материала магнита: $Br = 0,77$ Тл;
- Коэрцитивная сила материала магнита: $H_c = 1300000$ А/м;
- Реверсивная проницаемость материала магнита: $\rho = 8,3 \cdot 10^{-6}$ Г/м.

3.2.1. Определение основных размеров БДПТ

Предварительно определяем электромагнитную мощность:

$$P_{эм} = \frac{1+\eta}{2\eta} P_2 = \frac{1+0,6}{0,6} 10 = 11,33 \text{ Вт},$$

где $\eta = 0,6$ - КПД двигателя, определяемый по рисунку 3.1, P_2 - полезная мощность на валу.

Пар полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 400}{12000} = 2$$

$$2p=4.$$

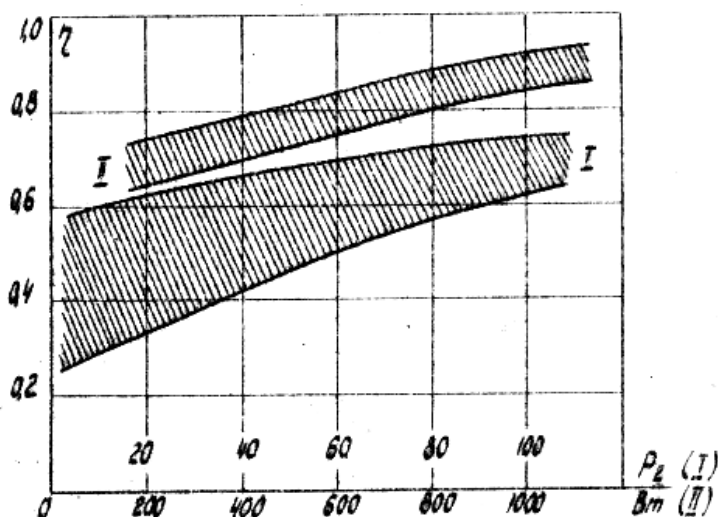


Рисунок 3.1 – Зависимость КПД от полезной мощности на валу

Среднее значение ЭДС двигателя предварительно определяем исходя из выражения электромагнитной мощности:

$$E_{cp} = \frac{1+\eta}{2} U = \frac{1+0,6}{2} 27 = 21, B,$$

Среднее значение тока:

$$I_{cp} = \frac{P_{эм}}{E_{cp}} = \frac{13,33}{21,6} = 0,617 A,$$

Действующее значение тока:

$$U' = U - \Delta U_{\kappa} = 27 - 0,5 = 26,5 B,$$

где $\Delta U_{\kappa} = 0,5 B$, - падение напряжения на коммутирующем элементе

$$k_g = \frac{\sqrt{1 + k_0 \left(\frac{E_{cp}}{U'} \right)^2 - 2 \frac{E_{cp}}{U'}}}{1 - \frac{E_{cp}}{U'}} = \frac{\sqrt{1 + 1,04 \left(\frac{21,6}{26,5} \right)^2 - 2 \frac{21,6}{26,5}}}{1 - \frac{21,6}{26,5}} = 1,333,$$

где $k_0 = 1,04$,

$$I_{\partial} = k_g \cdot I_{cp} = 1,33 \cdot 0,617 = 0,823 A,$$

Определим машинную постоянную, для этого предварительно определим индукцию в воздушном зазоре. Для двигателей с внутренним индуктором в форме цилиндра индукция:

$$B_{\delta} = \frac{k_B B_t}{k_{\sigma}} \cdot \frac{2P(1 - \sqrt{1 - k_{зм}})}{\alpha_{\delta} \pi} = \frac{0,657 \cdot 0,77}{1,15} \cdot \frac{2 \cdot 10(1 - \sqrt{1 - 0,75})}{0,77 \cdot 3,14} = 0,488 T,$$

где $k_B = 0,98 \cdot \sqrt{\gamma_{\phi}} = 0,657$ - коэффициент использования остаточной индукции, $\gamma_{\phi} = 0,45$ - коэффициент формы кривой размагничивания; $B_t = 0,77 T$ - остаточная индукция материала магнита; $k_{зм} = 0,75$ - коэффициент заполнения поперечного сечения индуктора магнитом; $k_{\sigma} = 1,15$ - коэффициент магнитного рассеяния индуктора; $\alpha_{\delta} = 1,1 \cdot \alpha = 0,77$, - коэффициент расчетной полюсной дуги, где $\alpha = 0,7$ - коэффициент полюсной дуги.

Линейная нагрузка выбирается по кривым (Рисунок 3.2):

$$A = 6 \cdot 10^3 \frac{A}{м},$$

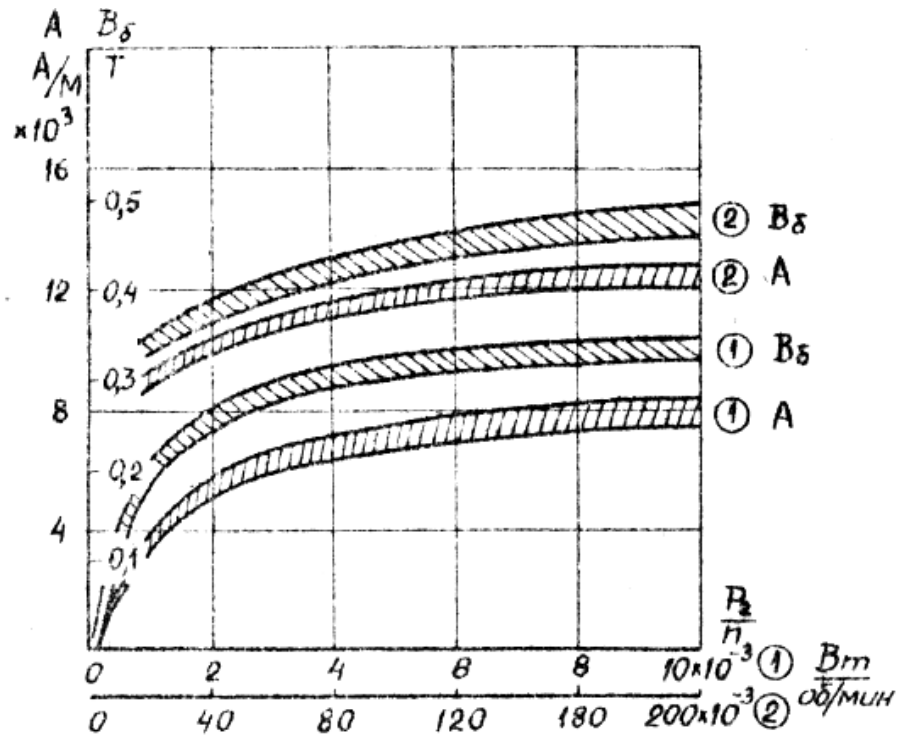


Рисунок 3.2

Машинная постоянная:

$$C_m = \frac{6}{0,75 \frac{k_{об}}{k_g} k_L \alpha_\delta B_\delta A} = \frac{6}{0,75 \frac{0,88}{1,33} \cdot 1 \cdot 0,77 \cdot 0,488 \cdot 6 \cdot 10^3} = 5,38 \cdot 10^{-3},$$

где $k_{об} = 0,88$ - обмоточный коэффициент; $k_L = 1$ - коэффициент, учитывающий влияние индуктивности.

При мощности меньше 100Вт воздушный зазор между якорем и полюсом индуктора:

$$\delta_{вз} = 0,2 \cdot 10^{-3} м,$$

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{C_m P_{ЭМ}}{\lambda_\kappa \chi k_L n}} = \sqrt[3]{\frac{5,38 \cdot 10^{-3} \cdot 13,335}{0,74 \cdot 0,495 \cdot 1 \cdot 12 \cdot 10^3}} = 0,025 м,$$

где $\chi = 0,75 \frac{k_{об}}{k_g} = 0,495$, $\lambda_k = 0,74$ - конструктивный коэффициент.

Расчётная длина якоря:

$$l_\delta = \lambda_k D_a = 0,74 \cdot 0,03 = 0,019 \text{ м},$$

Действительная длина пакета якоря:

$$l_a = 0,9 \cdot l_\delta = 0,9 \cdot 0,019 = 0,017 \text{ м},$$

Округляем расчетные значения до ближайших стандартных чисел ГОСТа 6636-69 - $D_a = 0,025 \text{ м}$; $l_a = 0,02 \text{ м}$ [7].

3.2.2. Обмотка якоря

Число пазов на полюс и фазу (секцию) принимается в пределах $q=1 \div 4$.
При числе пар полюсов $p=2$ рекомендуется принимать $q=4$.

Число пазов якоря

$$z = pmq = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24,$$

где m - число секций обмотки якоря.

Полюсное деление

$$\tau = \pi \cdot \frac{D_a}{2 \cdot p} = 3,14 \cdot \frac{0,03}{2 \cdot 2} = 0,02.$$

Поток в воздушном зазоре при синусоидальном распределении

$$\Phi = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot l_\delta \cdot \tau = 0,77 \cdot 0,488 \cdot 0,019 \cdot 0,02 = 1,384 \cdot 10^{-4} \text{ Вб},$$

Число витков секций при однополупериодной 120-градусной коммутации и синусоидальном поле

$$w = \frac{11,5 E_{cp}}{p n k_{об} \Phi} = \frac{11,5 \cdot 21,6}{2 \cdot 12000 \cdot 0,88 \cdot 1,384 \cdot 10^{-4}} = 85,0,$$

Принимаем $w = 85$.

Пределы плотности тока в обмотке якоря $j_a = 4 \div 9 \text{ А / мм}^2$, которые получены основываясь на опыте проектирования. Принимаем $j_a = 8 \text{ А / мм}^2$.

Действующее значение тока секции

$$\dot{I}_{SH} = \frac{I_o}{\sqrt{3}} = \frac{0,823}{\sqrt{3}} = 0,475 A,$$

Сечение провода обмотки якоря

$$q_a = \frac{\dot{I}_{SH}}{j_a} = 0,059 \text{ мм}^2,$$

Выбираем медный провод ПЭЭИД2-200-МЭК 0,280 ТУ 16.К71-250-95, учитывая экстремальные условия работы в космосе.

- Температура окружающей среды, нижний предел -60°C ;
- Температурный индекс 200 (Н) $^\circ\text{C}$;
- Термопластичный поток 320°C .

Сечение и диаметр изолированного провода обмотки

$$d_{из} = 0,28 \text{ мм},$$

$$q_{au} = \frac{\pi d_{из}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,28^2}{4} = 0,062 \text{ мм}^2.$$

3.2.3. Пазово-зубцовая зона и спинка якоря

Пакет якоря БДПТ набирается из листов электротехнической стали марки Э44.

В качестве исходной величины определения размеров пазово-зубцовой зоны служит площадь паза:

$$Q_n = \frac{w \cdot q_{au} \cdot 10^{-6}}{p \cdot q \cdot k_{zn}} = \frac{66 \cdot 0,062 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 4 \cdot 0,4} = 1,636 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $k_{zn} = 0,4$ - коэффициент заполнения паза изолированным проводом.

Зубцовое деление по окружности якоря:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_a}{z} = \frac{3,14 \cdot 0,025}{24} = 3,272 \cdot 10^{-3},$$

Ширина зубца в случае трапецеидальной формы:

$$b_z = \frac{B_\delta \cdot t_1}{B_z \cdot k_c} = \frac{0,488 \cdot 1,295 \cdot 10^{-3}}{1,4 \cdot 0,88} = 1,295 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $B_z = 1,4 \text{ Тл}$ - индукция в зубце, $k_c = 0,88$ - коэффициент заполнения якоря сталью. Ширина зубца соответствует условиям $b_z \geq 1 \cdot 10^{-3}$.

Основные размеры паза наружного якоря. Трапециoidalный паз:

$$b_1 = -b_z + \frac{\pi(D_a + 2h_{yc} + 2h_{кл})}{z} = -1,166 \cdot 10^{-3} + \frac{3,14(0,025 + 2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3})}{24} = 2,161 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$b_2 = \sqrt{b_1^2 + Q_n \frac{4\pi}{z}} = \sqrt{(2,161 \cdot 10^{-3})^2 + 1,636 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3,14}{24}} = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$h_n = \frac{2 \cdot Q_n}{b_1 + b_2} + h_{yc} + h_{кл} = \frac{2 \cdot 1,636 \cdot 10^{-6}}{2,161 \cdot 10^{-3} + 2,35 \cdot 10^{-3}} + 0,4 \cdot 10^{-3} + 0,3 \cdot 10^{-3} = 1,425 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $h_{yc} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - высота усика, $h_{кл} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - толщина клина, выполненного из электрокартона.

Высота спинки якоря

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{1,384 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,019 \cdot 0,88} = 3,808 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $B_a = 1,1 \text{ Тл}$ - индукция в спинке якоря.

Наружный диаметр пакета якоря:

$$D_{ан} = D_a + 2(h_n + h_a) = 0,025 + 2(1,425 \cdot 10^{-3} + 3,808 \cdot 10^{-3}) = 0,035 \text{ м}.$$

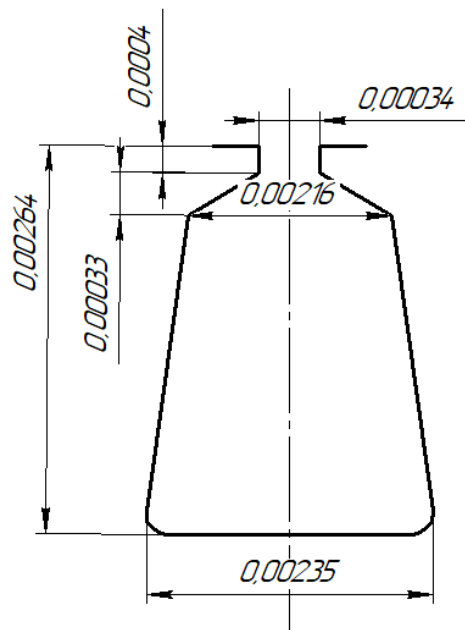


Рисунок 3.3 - Паз якоря

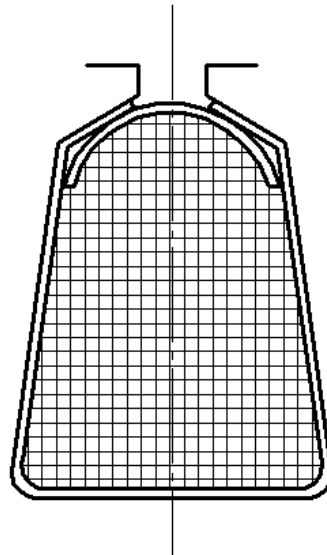


Рисунок 3.4 - Паз якоря с изоляцией

3.2.4. Параметры обмотки якоря и выбор коммутирующих элементов

Полюсное деление, отнесенное к среднему диаметру:

$$\tau_{cp} = \frac{(D_a + h_n)}{2p} = \frac{0,025 + 1,425 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = 0,021,$$

Средний диаметр

$$D_{cp} = D_a + h_n = 0,026 \text{ м},$$

Длина лобовой части полувитка:

$$l_{лб} = 1,4 k_L \tau_{cp} = 1,4 \cdot 1 \cdot 0,021 = 0,029 \text{ м},$$

Средняя длина свитка секции обмотки якоря:

$$l_g = 2(l_\delta + l_{лб}) = 2(0,019 + 0,029) = 0,096 \text{ м},$$

Активное сопротивление секции:

$$\iota = k_Q \frac{w \cdot l_g}{57 q_{au}} = 1,38 \frac{85 \cdot 0,096}{57 \cdot 0,062} = 3,197,$$

где $k_Q = 1 + 0,004(t_p - 20) = 1,38$ — коэффициент увеличения сопротивления обмотки при повышении температуры от 20°C до расчетного значения $t_p = 115^\circ\text{C}$ (Для класса изоляции F и H).

Суммарная магнитная проводимость

$$\sum \Lambda = \Lambda_n + \Lambda_{лб} + \Lambda_u,$$

Которая включает в себя

— проводимость пазового рассеяния

$$\Lambda_n = \frac{h_1}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_1} + \frac{3h_3}{b_1 + 2b_{u1}} + \frac{h_{yc}}{b_{u1}} \right) k_{\beta 1} = \frac{1,938 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 1,917 \cdot 10^{-3}} k_\beta + \left(\frac{0,35 \cdot 10^{-3}}{1,917 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 0,326 \cdot 10^{-3}}{1,917 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3,42 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 10^{-4}} \right) 0,021 = 0,125,$$

$$\text{где } k_{\beta 1} = \beta = 0,021, k_\beta = \frac{1 + \beta}{4} = 0,265, b_{u1} = (d_{из} \cdot 2\Delta u + 0,2) \cdot 10^{-3} = 3,42 \cdot 10^{-4}.$$

— проводимость рассеяния лобовых частей

$$\Lambda_{лб} = 0,34 \frac{q}{l_\delta} (l_{лб} - 0,64 \beta \tau) = 0,34 \frac{4}{0,022} (0,072 - 0,64 \cdot 0,021 \cdot 0,047) = 4,405,$$

— проводимость индуктора в форме цилиндра

$$\Lambda_u = 0,6 \frac{\rho_s}{r \mu_0} = 0,6 \cdot \frac{8,3 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}} = 3,965,$$

$$\sum \Lambda = \Lambda_n + \Lambda_{лб} + \Lambda_u = 0,097 + 2,072 + 1,982 = 4,151,$$

Индукция секции обмотки якоря

$$L = 2\mu_0 \frac{w^2 l_\delta}{pq} \sum \Lambda = 2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 4,151 \frac{85^2 \cdot 0,019}{2 \cdot 4} = 0,109 \text{ Гн},$$

Определив параметры обмотки якоря, проверим среднее значение тока двигателя

$$I_{cp} = \frac{U - (E_{cp} + \Delta U_\kappa)}{R} = \frac{27 - (21,6 + 0,5)}{6,393} = 0,716 \text{ А},$$

где $R = 2 \cdot \iota = 6,393 \text{ Ом}$ активное сопротивление

Базовая скорость вращения

$$n_\delta = \frac{11,5 \cdot U_n}{w \cdot p \cdot k_{o\delta} \cdot \Phi} = \frac{11,5 \cdot 27}{85 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1,384 \cdot 10^{-4}} = 1,326 \cdot 10^4 \text{ об / мин},$$

$$\omega_\delta = \frac{p\pi n_\delta}{30} = \frac{1 \cdot 3,14 \cdot 1,211 \cdot 10^4}{30} = 1,268 \cdot 10^3 \text{ рад / с},$$

Тактность коммутации

$$m = m_c = 4,$$

$$L_\delta = L = 0,109 \text{ Гн},$$

$$T_m = \frac{60}{pn_\delta m} = \frac{60}{2 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 4} = 6,25 \cdot 10^{-4},$$

$$\tau_s = \frac{L_\delta}{R} = \frac{0,109}{6,393} = 0,017,$$

$$\beta = \frac{T_m}{\tau_s} = \frac{6,25 \cdot 10^{-3}}{0,061} = 0,037,$$

Для выбора коммутирующих элементов необходимо учитывать максимально возможные токи машины. Для реверсивного БДПТ:

$$I_{\max} = \frac{\frac{U + c \cdot E_{cp}}{a_n} - \Delta U_\kappa}{\iota} = \frac{\frac{27 + 1,209 \cdot 21,6}{2} - 0,5}{3,197} = 8,152 \text{ А},$$

где $c = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} = 1,209$, a_n - число последовательно соединенных секций.

$$U_\kappa = U.$$

Выбираем тип транзисторов для коммутатора.

$$U_{\kappa \max} = U_{\max} + U_{\text{ст}} = 29,7 + 30 = 59,7 \text{ В},$$

Где $U_{\text{ст}}$ – напряжение стабилизации стабилитрона.

Функцию ограничительного устройства выполняют стабилитроны типа Д815Е. Два стабилитрона соединяются последовательно. Максимально возможное значение тока якоря - $I_{\max} = 8,152 \text{ А}$.

Выбираем транзисторы:

- карбидокремниевые MOSFET транзисторы C2M0160120D используем для управления силовыми транзисторами;
- силовые транзисторы - C2M0025120D.

Таблица 3 - Характеристики транзисторов

C2M0160120D	C2M0025120D
$U_{\text{кэдоп1}} = 1200 \text{ В} > U_{\text{кэмакс1}} = 59,7 \text{ В}$	$U_{\text{кэдоп}} = 1200 \text{ В} > U_{\text{кэмакс}} = 59,7 \text{ В}$
$I_{\text{кдоп1}} = 11 \text{ А} > I_{\text{кмакс1}} = 8,152 \text{ А}$	$I_{\text{кдоп}} = 90 \text{ А} > I_{\text{кмакс}} = 81,52 \text{ А}$
$\kappa_{y1} = 12$	$\kappa_y = 60$
$R_{\text{нас1}} = 0,16 \text{ Ом}$	$R_{\text{нас}} = 0,025 \text{ Ом}$
Минимальная рабочая температура: - 55 С	Минимальная рабочая температура: - 55 С
Максимальная рабочая температура: + 150 С	Максимальная рабочая температура: + 150 С

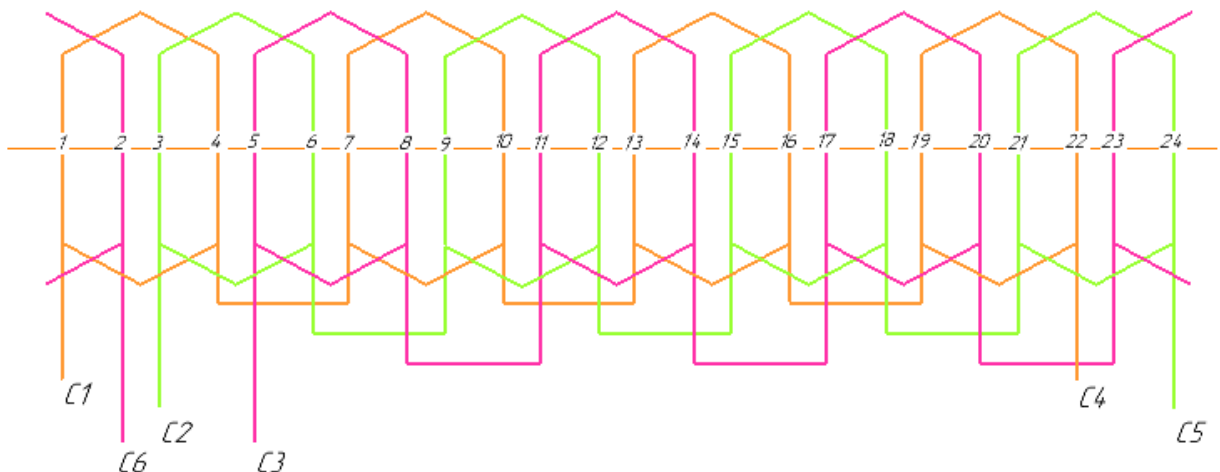


Рисунок 3.5 – Схема обмотки якоря

3.2.5. Расчет магнитной цепи

Расчетный воздушный зазор:

$$\delta = k_{\delta} \cdot \delta = 0,011 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 2,14 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где
$$k_{\delta} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta}{t_1 + B_{\delta} + 10 \cdot \delta} = \frac{3,272 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{3,272 \cdot 10^{-3} + 0,488 + 10 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0,011 -$$

коэффициент воздушного зазора.

Намагничивающая сила воздушного зазора на пару полюсов

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,488 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 = 156,022 \text{ А}.$$

Индукция в зубце:

$$B_z = B_{\delta} \frac{t_1}{b_z k_c} = 0,488 \frac{3,272 \cdot 10^{-3}}{1,295 \cdot 10^{-3} \cdot 0,88} = 1,4 \text{ Т},$$

По кривым намагничивания материала Э44 определяем напряженность поля в зубце (Рисунок 3.4)

$$H_z = 1500 \text{ А / м},$$

$$h_z = h_n = 1,425 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Намагничивающая сила зубцов якоря

$$F_z = 2 h_z H_z = 2 \cdot 1,425 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 = 4,275 \text{ А}.$$

Индукция в спинке якоря

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{1,384 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 6,808 \cdot 10^{-3} \cdot 0,019 \cdot 0,88} = 1,1 \text{ Т},$$

По кривым намагничивания напряженность поля спинки якоря (Рисунок 3.4)

$$H_a = 310 \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

Намагничивающая сила спинки якоря

$$F_a = \zeta_a \cdot H_a \cdot \xi_0 = 0,025 \cdot 310 \cdot 0,6 = 4,625 \text{ А},$$

где $\xi_0 = 0,6$ - коэффициент, учитывающий неравномерность величины индукции вдоль средней линии магнитной индукции,
 $\zeta_a = \frac{\pi(D_a + 2 \cdot h_z + h_a)}{2p} = 0,025$, - длина средней линии магнитной индукции при внешнем якоре.

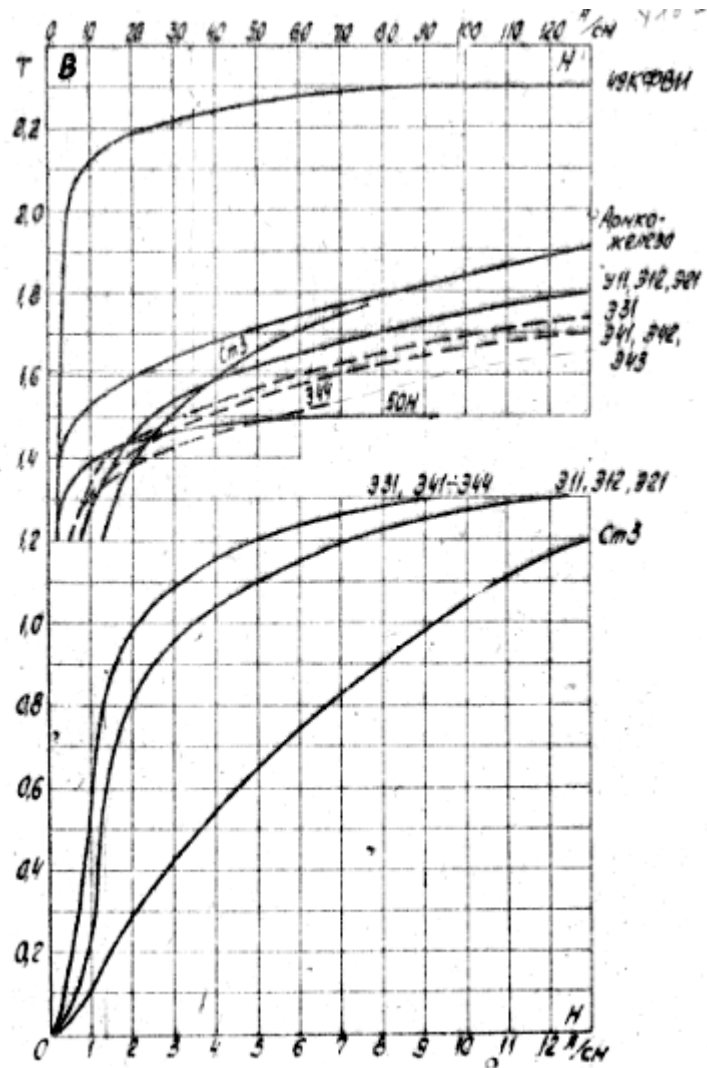


Рисунок 3.4 – Кривая намагничивания сталей

Полная намагничивающая сила магнитной цепи

$$F_n = F_\delta + F_z + F_a = 156,022 + 4,275 + 4,625 = 164,923 \text{ A},$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи (обычно $k_\mu = 1,03 \div 1,15$)

$$k_\mu = \frac{F_n}{F_\delta} = \frac{164,923}{156,022} = 1,057.$$

Проводим расчеты для ряда значений индукции B_δ (Таблица 3) для того, чтобы построить кривую намагничивания (Рисунок 3.5)

Таблица 3.1 – Данные расчета кривой намагничивания

Величина	kB_δ										
	$0,25B_\delta$	$0,5B_\delta$	$0,65B_\delta$	$0,8B_\delta$	$0,9B_\delta$	B_δ	$1,08B_\delta$	$1,15B_\delta$	$1,3B_\delta$	$1,6B_\delta$	$1,8B_\delta$
Φ	$3,57 \cdot 10^{-5}$	$7,139 \cdot 10^{-5}$	$9,281 \cdot 10^{-5}$	$1,142 \cdot 10^{-4}$	$1,285 \cdot 10^{-4}$	$1,428 \cdot 10^{-4}$	$1,542 \cdot 10^{-4}$	$1,642 \cdot 10^{-4}$	$1,856 \cdot 10^{-4}$	$2,285 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-4}$
B_z	0,35	0,701	0,911	1,121	1,261	1,401	1,513	1,611	1,821	2,242	2,522
B_a	0,28	0,561	0,729	0,897	1,009	1,121	1,21	1,29	1,428	1,794	2,018
H_z	82	110	160	320	650	2300	5100	9400	12000	20000	80000
H_a	72	100	115	140	200	280	470	700	3000	11000	15000
F_δ	39,04	78,08	101,5	124,9	140,5	156,2	168,6	179,5	203,0	249,85	281,1
F_z	0,234	0,313	0,456	0,912	1,853	6,55	14,53	26,79	34,2	57	228
F_a	1,08	1,5	1,725	2,1	3	4,2	7,05	10,5	45	165	225
F	40,354	79,89	103,68	127,9	145,4	166,9 15	190,2 4	216,8 74	282,2	471,85	734,08
$B_{\delta M} = \Phi / Q_M$	0,145	0,29	0,377	0,464	0,522	0,58	0,627	0,668	0,755	0,929	1,045
$H = F / 2h_M$	1009	1997	2592	3199	3635	4173	4756	5422	7055	11800	18350

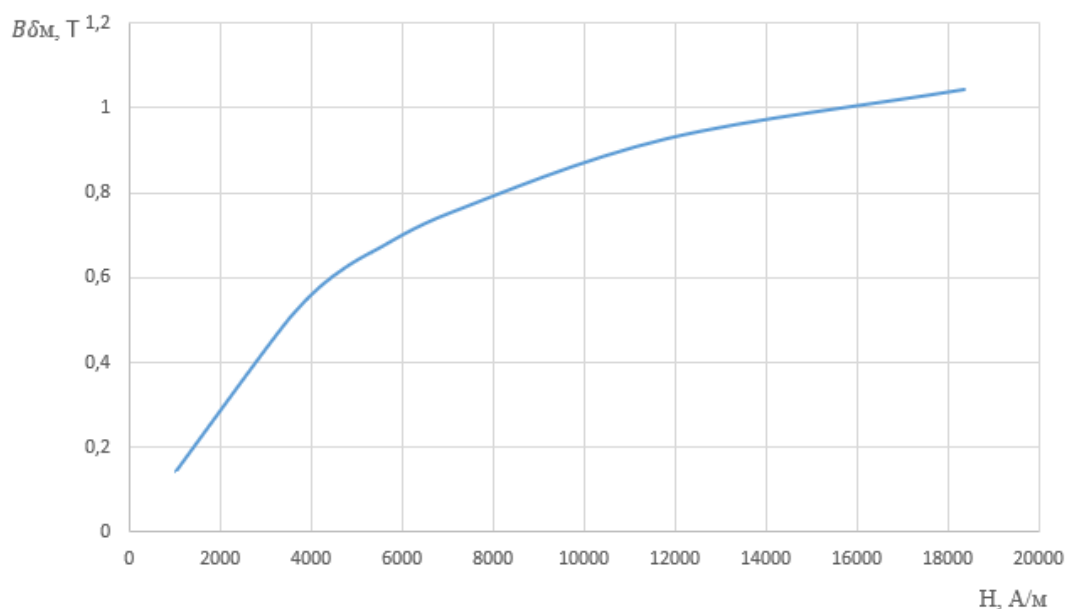


Рисунок 3.5 – Кривая намагничивания

Эквивалентный воздушный зазор

$$\delta'' = k_{\mu} \cdot \delta = 2,262 \cdot 10^{-6},$$

3.2.6. Расчет индуктора

Наружный диаметры индуктора

$$D_{\text{мн}} = D_a - 2\delta = 0,025 - 2 \cdot 10^{-4} = 0,03 \text{ м},$$

Внутренний диаметр магнита в машинах с индуктором в виде цилиндра можно определить:

$$D_{\text{мв}} = D_{\text{мн}} \sqrt{1 - k_{\text{зм}}} = 0,025 \cdot \sqrt{1 - 0,75} = 0,012 \text{ м},$$

где $k_{\text{зм}} = 0,75$,

Так как $D_{\text{мв}} \geq 5 \text{ мм}$, то применяем немагнитную втулку и вал изготавливаем из углеродистой стали.

Длина полюсной дуги:

$$b = \alpha \cdot \tau = 0,7 \cdot 0,02 = 0,014,$$

Ширина магнита в нейтральном сечении для цилиндра:

$$\frac{b_{\text{м}}}{2} = 0,5(D_{\text{мн}} - D_{\text{мв}}) = 0,5(0,025 - 0,015) = 6,15 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Осевая длина магнита

$$l_{\text{м}} = 1,0 \cdot l_a = 0,02 \text{ м},$$

Площадь нейтрального сечения магнита

$$Q_{\text{м}} = b_{\text{м}} \cdot l_{\text{м}} = 0,012 \cdot 0,02 = 2,46 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

Размагничивающая сила реакции якоря на пару полюсов:

$$F_{\text{ад}} = \frac{0,866 \cdot w \cdot k_{\text{об}} I_{\text{ср}}}{p} = \frac{0,866 \cdot 88 \cdot 1 \cdot 0,617}{2} = 22,719 \text{ А}.$$

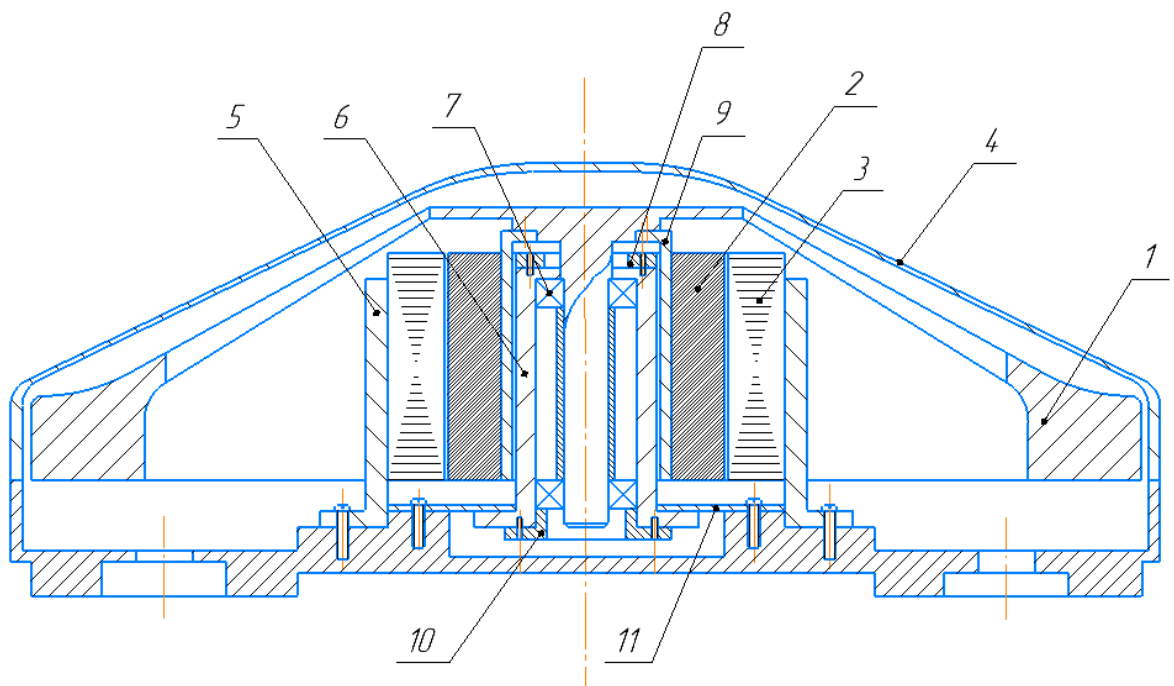


Рисунок 3.6 – Сборочный чертеж электродвигатель-маховика

где 1 – маховик; 2 – ротор ЭД; 3 – статор ЭД; 4 – кожух; 5 – стакан;
6 – втулка; 7 – подшипниковая опора; 8 – фланец; 9 – втулка; 10 – фланец; 11 –
платформа.

3.3. Рабочие характеристики БДПТ

Рассчитываем и строим рабочие характеристики двигателя для номинальной частоты вращения, а также для частот в диапазоне от n_0 до $0,8n$.

Производим вычисления по следующим формулам:

Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{эл} = I_{\partial}^2 R.$$

Потери в коммутирующем устройстве

$$P_{\kappa} = m \cdot I_{cp} \Delta U_{\kappa}$$

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи

$$P_{мг} = p_0 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,4} (B_a^2 m_a k_{TA} + B_z m_z k_{TZ})$$

где $p_0 = 19$ - удельные потери в стали на гистерезис и вихревые токи при частоте 400 Гц и индукции 1Т, $k_{TZ} = 2,1$, $k_{TA} = 1,5$ - технологические коэффициенты, учитывающие увеличение магнитных потерь в зубцах и спинке якоря после механической обработки.

$m_a = \pi(D_a + 2h_z + h_a)h_a l_a k_c \gamma = 3,14(0,03 + 2 \cdot 2,638 \cdot 10^{-3} + 9,138 \cdot 10^{-3})9,138 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 \cdot 0,88 \cdot 7,7 \cdot 10^3 = 0,173 \text{ кг}$,
- масса спинки якоря,

$m_z = \pi[(D_a + h_z)h_z - Q_n z]l_a k_c \gamma = 3,14[(0,03 + 2,638 \cdot 10^{-3})2,638 \cdot 10^{-3} - 4,083 \cdot 10^{-3} \cdot 32]0,02 \cdot 0,88 \cdot 7,7 \cdot 10^3 = 0,019 \text{ кг}$,
- масса зубцов якоря.

Механические потери

$$P_{\text{мех}} = 1,4 \cdot 10^4 (1 + 5\lambda_g) \left(\frac{n_H}{10000} \right)^{2,5} D_a^4$$

$$\text{где } \lambda_g = \frac{l_\delta}{D_\delta} = \frac{0,02}{0,025} = 0,8$$

Добавочные потери

$$P_\partial = 0,01(P_H + P_{эл} + P_K + P_{\text{мех}} + P_{\text{мс}}).$$

$$I_{cp} = \frac{U - E_{cp} - \Delta U_K}{R},$$

$$\sum P = P_{эл} + P_{мг} + P_{\text{мех}} + P_K + P_\partial,$$

$$P_1 = UI_{cp},$$

$$P_2 = UI_{cp} - \sum P,$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%,$$

$$M_2 = \frac{9,55 P_2}{n}.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 4, а рабочие характеристики изображены на рисунке 3.7.

Таблица 4 – Данные для рабочей характеристики

N		1,18n ₀	1,17n	1,15n	1,11n	1,08n	1,05n	1,025n	1,01n	n	0,8n
n	Об/ мин	15440	14040	13800	13320	12960	12600	12300	12120	12000	9600
k _L		0,521	0,567	0,588	0,611	0,612	0,625	0,631	0,65	0,682	0,75
E _{ср}	В	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
I _{ср}	А	0,399	0,434	0,451	0,468	0,469	0,479	0,493	0,498	0,523	0,575
P _{эм}	Вт	8,626	9,382	9,739	10,117	10,127	10,347	10,452	10,761	11,288	12,417
I _g	А	0,532	0,579	0,601	0,624	0,625	0,639	0,645	0,664	0,697	0,766
P _{эл}	Вт	0,604	0,714	0,77	0,831	0,833	0,869	0,887	0,94	0,013	0,01
P _k	Вт	0,399	0,434	0,451	0,468	0,469	0,479	0,484	0,498	0,523	0,575
P _{мг}	Вт	7,238	6,335	6,184	5,885	5,663	5,44	5,264	5,165	5,085	3,72
P _{мх}	Вт	0,082	0,065	0,062	0,057	0,053	0,049	0,046	0,045	0,044	0,025
P _g	Вт	0,012	0,014	0,014	0,015	0,015	0,015	0,016	0,074	0,00714	0,0071
ΣP	Вт	1,233	1,393	1,46	1,526	1,519	1,557	1,572	1,636	0,722	0,0717
P ₁	Вт	10,783	11,727	12,173	12,647	12,659	12,934	13,065	13,451	14,11	15,521
P ₂	Вт	9,55	10,33	10,714	11,121	11,14	11,377	11,493	11,816	13,388	14,8
η	%	88,57	88,117	88,1	87,933	88,003	87,964	87,968	87,839	94,2	95,3
M ₂	10 ⁻³ Нм	5,906	7,029	7,414	7,873	8,209	8,623	8,923	9,31	11	15

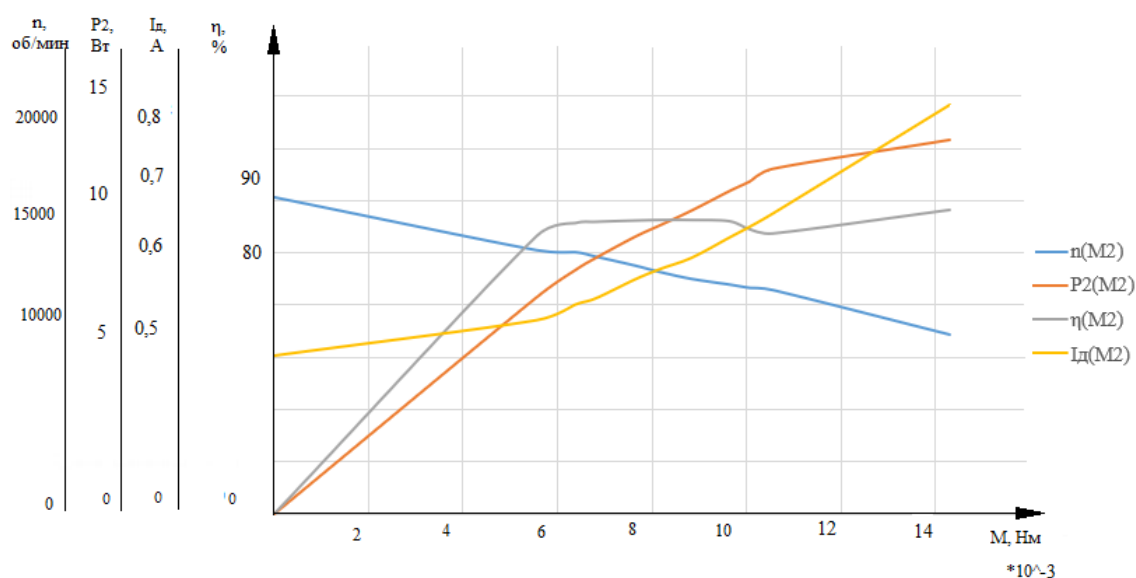


Рисунок 3.7 – Рабочие характеристики БДПТ

4. РАБОЧАЯ ДИАГРАММА МАГНИТА

На основании данных, полученных в результате расчета магнитной цепи машины, строим рабочую диаграмму магнита (Рисунок 4.1). Благодаря этой диаграмме можно найти значение магнитного потока в воздушном зазор при любом режиме работы.

В случае применения редкоземельных материалов и кобальта кривая размагничивания совпадает с прямой возврата. Эту кривую получают по двум точкам: остаточному потоку Φ_r и коэрцитивной силе – МДС F_c .

Данные для построения диаграммы для КС37:

$$\Phi_r = B_t Q_m = 0,77 \cdot 2,46 \cdot 10^{-4} = 1,894 \cdot 10^{-4} \text{ Вб},$$

$$F_c = 2 \cdot h_m \cdot H_c \cdot 1000 = 2 \cdot 0,02 \cdot 1300 \cdot 1000 = 5,2 \cdot 10^4 \text{ А},$$

Прямая суммарного рассеяния

$$\Phi_s = 0,5 \cdot F \cdot \Lambda_u \cdot 10^{-6}$$

Вычитая графически эту характеристику из прямой размагничивания, получаем линию $\Phi_r - M$ продольного (полезного) потока Φ_d .

Поток магнита

$$\Phi_{ma} = \Phi_{sm} + \Phi_{\delta 0} = 3,623 \cdot 10^{-4} \text{ Вб},$$

где $\Phi_{sm} = 0,5 F_n \Lambda_u 10^{-6} = 0,5 \cdot 164,923 \cdot 1,982 \cdot 10^{-6} = 1,635 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ - поток рассеяния магнита

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{30E}{4\pi k_b k_0 f n_n} = \frac{30 \cdot 26,68}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,1 \cdot 1,04 \cdot 400 \cdot 12000} = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ Вб},$$

$$\Phi_{ma} = \Phi_{sm} + \Phi_{\delta 0} = 1,751 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

$$0,75 F_c = 3,9 \cdot 10^4 \text{ А}.$$

Диаграмма магнита изображена на рисунке 4.1.

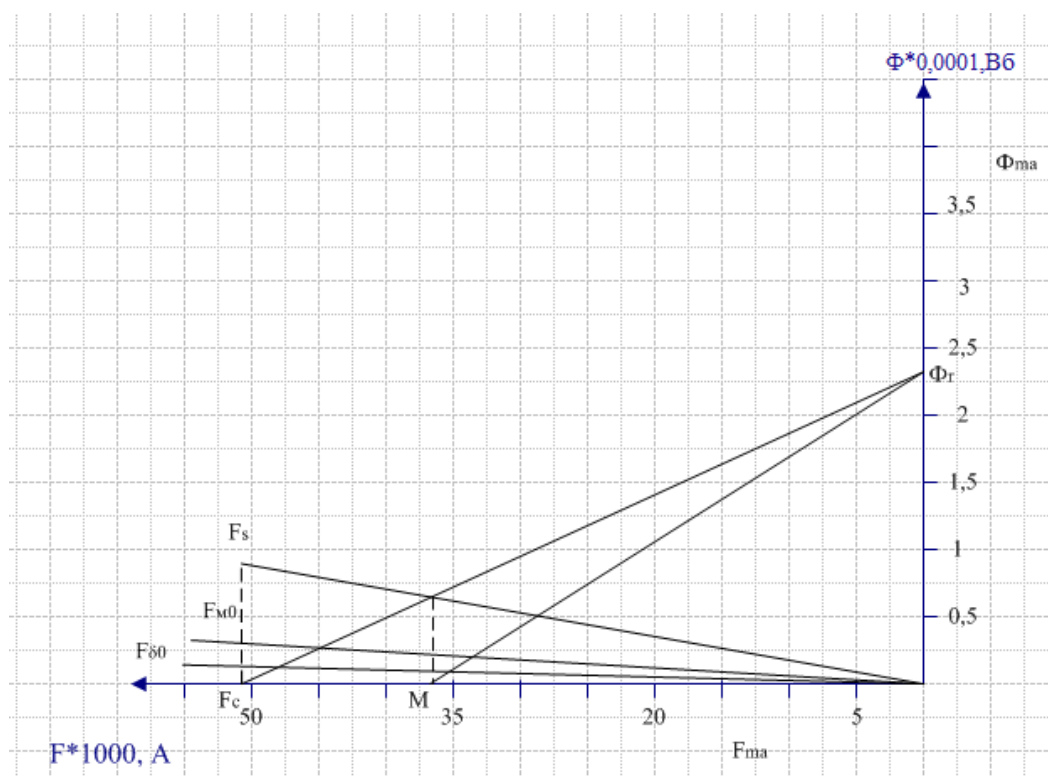


Рисунок 4.1 – Рабочая диаграмма магнита

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Цель выпускной квалификационной работы – проектирование бесконтактного двигателя постоянного тока на основе постоянных магнитов, служащего для системы ориентации космического аппарата.

В этом разделе дипломной работы необходимо обосновать целесообразность применения предложенного технического решения. Для этого необходимо изучить вопросы финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

5.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ) является частью двигателя-маховика, служащего для систем ориентации космических аппаратов. Он обеспечивает необходимое положение космического аппарата в пространстве.

В настоящее время такие приборы используются на международной космической станции. С постоянным развитием уровня технологий, появляются новые конструкции электроприводов, обладающие меньшими недостатками по сравнению со старыми конструкциями. Соответственно, потребителями результатов исследования в данной работе являются компании и научно- производственные объединения, чья деятельность связана с производством оборудования и приборов, востребованных в космонавтике. Одна из таких компаний — это АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва». Данное предприятие является Ведущим в России по созданию космических аппаратов связи, ретрансляции, навигации, геодезии.

В данном случае сегментирования целесообразно провести по таким критериям, как размер космического аппарата (КА) и частота вращения

исполнительного органа (ИО), так как это одни из наиболее важных параметров для систем ориентации КА.

Исходя из перечисленных сегментов рынка произведем сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено на рисунке 5.1.

		Размер КА		
		Малые	Средние	Большие
Частота вращения, об/мин	<10000			
	<20000			
	>40000			

Рисунок 5.1 - Карта сегментирования рынка использования электромеханических исполнительных органов (ЭМИО)

■ - Teldix GmbH; ■ - НПП «ВНИИЭМ»; ■ - АО «НПЦ «Полюс».

В итоге видим, что основными сегментами рынка являются все виды деятельности, связанные с использованием исполнительных органов для малых и средних космических аппаратов, а частота вращения исполнительного органа либо меньше 10000 об/мин либо больше 40000 об/мин. Поэтому целесообразно ориентирование на сегменты рынка, связанные с производством электромеханических исполнительных органов для малых космических аппаратов с частотой вращения больше 10000 об/мин, но меньше 40000 об/мин.

5.2. Анализ рынка и оценка конкурентоспособности продукции

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Критерии для сравнения и оценки

ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 5.2, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации [10].

Заполним оценочную карту конкурентных исполнительных органов, где
Бф – Двигатель маховик на основе бесконтактного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами;

Бк1 (Конкурент 2) – Reaction wheel system HR04, Honeywell corporation;

Бк2 (Конкурент 2) - Двигатель маховик МДМ-0,5, АО «НПЦ» Полюс

Таблица 5.1 - Технические характеристики исполнительных органов

Прибор	Кинетический момент, Н·мс	Максимальный управляющий момент, Н·м	Масса, кг	Ресурс работы, ч
HR04	0,2-1,0	0,028	1,2	50000
МДМ-0,5	0,5	0,015	1,2	150000

Таблица 5.2 - Оценочная карта электромеханических исполнительных органов

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности	0,06	5	4	4	0,3	0,24	0,24
2.Удобство в эксплуатации	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
3.Помехоустойчивость	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
4.Энергоэкономичность	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
5.Надежность	0,06	5	3	4	0,3	0,18	0,24
6.Уровень шума	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
7.Безопасность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
8.Функциональная мощность	0,06	4	5	3	0,24	0,3	0,18
9.Простота эксплуатации	0,1	4	2	4	0,4	0,2	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1.Конкурентоспособность	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24

продукта							
2.Уровень проникновения на рынок	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
3.Цена	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
5.Послепродажное обслуживание	0,06	3	3	4	0,18	0,18	0,24
6.Наличие сертификата	0,06	4	5	5	0,24	0,3	0,3
Итого	1				4,16	4,1	3,9

Примечание – оценка факторов конкурентоспособности шкале 1–5, где 1 – низшая оценка, а 5 – высшая оценка.

Из таблицы 5.2 видно, что по уровню показателей разрабатываемый двигатель маховик на основе бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ) с постоянными магнитами и импортная система HR04 обладают более высокими конкурентными преимуществами.

5.3. Технология QuaD

Проведем оценку конкурентных технических решений контактора постоянного тока (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений электромеханических исполнительных органов

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатель оценки качества					
1.Энергоэффективность	0,09	90	100	0,9	0,081
2.Помехоустойчивость	0,05	88	100	0,88	0,044
3.Надежность	0,1	92	100	0,92	0,092
4.Унифицированность	0,05	80	100	0,8	0,04
5.Уровень материалоемкости разработки	0,08	70	100	0,7	0,056
6.Уровень шума	0,02	75	100	0,75	0,015
7.Безопасность	0,1	90	100	0,9	0,09
8.Функциональная мощность	0,063	95	100	0,95	0,05985
9.Простота эксплуатации	0,05	85	100	0,85	0,0425
10.Ремонтопригодность	0,05	50	100	0,5	0,025

Показатели оценки коммерческого потенциала					
11.Конкурентноспособность	0,05	90	100	0,9	0,045
12.Уровень проникновения на рынок	0,05	80	100	0,8	0,04
13.Перспективность рынка	0,05	85	100	0,85	0,0425
14.Цена	0,1	65	100	0,65	0,065
15.Послепродажное обслуживание	0,02	75	100	0,75	0,015
16.Финансовая эффективность	0,04	92	100	0,92	0,0368
17. Наличие сертификата	0,07	55	100	0,55	0,0385
Итого	1			13,57	0,82815

Определим оценку качества и перспективности по технологиям QuaD по формуле:

$$\text{Пср} = 8,1 + 4,4 + 9,2 + 4,0 + 5,6 + 1,5 + 9 + 5,985 + 4,25 + 2,5 + 4,0 + 4,25 + 6,5 + 1,5 + 3,68 + 3,85 = 82,815\%$$

Перспективность применения разрабатываемого электропривода системы ориентации космического аппарата составила 82,815%, что говорит о перспективности разработки.

5.4. SWOT-анализ работы магнитоэлектрического двигателя

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента и представляет собой комплексное исследование технического проекта.[13] Данный анализ позволит определить все сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы.

SWOT-анализ проводится в два этапа. На первом этапе описываются сильные и слабые стороны проекта, выявляются возможности и угрозы реализации проекта. Для этого составляется матрица SWOT, в которой все перечисленное ранее фиксируется.

На втором этапе выявляются соответствия сильных и слабых сторон проекта внешним условиям окружающей среды, которые показывают необходимость проведения стратегических изменений. Для данного этапа

строится интерактивная матрица проекта, на которой удобно разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT.

При составлении матрицы SWOT используются следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности; У – угрозы.

Матрица SWOT приведена в таблице 5.4.

При построении на втором этапе интерактивной матрицы возможностей и угроз в основу берется матрица SWOT. Интерактивные матрицы позволяют оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации (Таблица 5.5). При их построении используются обозначения аналогичные самой матрицы SWOT с дополнением знаков (+,-,0) для подробного представления наличия возможностей и угроз проекта («+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие; «0» - если есть сомнения в том, поставить «+» или «-»).

Таблица 5.4 - Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта: С1. Высокая энергоэффективность. С2. Экологичность технологии. С3. Квалифицированный персонал. С4. Уменьшение затрат на ремонт оборудования	Слабые стороны проекта: Сл1. Трудность монтажа системы Сл2. Высокая стоимость оборудования Сл3. Высокая техническая ответственность электрооборудования Сл4. Сложность эксплуатации электрооборудования
Возможности: В1. Увеличение производительности электрооборудования В2. Повышение надежности конструкции	В1С1С2С3; В2С3С4; В3С1С2;	В1Сл3Сл4; В2Сл1Сл2Сл4; В3Сл1Сл2;

В3. Уменьшение массогабаритных показателей		
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологии производства У2. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У3. Угрозы выхода из строя сложного энергоемкого оборудования	У1С3; У2С2; У3С1;	У1Сл1Сл2Сл4; У2Сл1Сл3; У3Сл1Сл3Сл4.

Таблица 5.5 - Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта			
	С1	С2	С3	С4
В1	+	+	+	-
В2	+	-	+	+
В3	+	+	-	-
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
В1	-	0	+	+
В2	+	+	-	+
В3	+	+	-	0

Таблица 5.6 – Интерактивная матрица угроз





Возможности	Сильные стороны проекта			
	С1	С2	С3	С4
У1	-	-	+	-
У2	-	+	-	-
У3	+	-	-	0
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
У1	+	+	-	+
У2	+	-	+	-
У3	+	-	+	+

Проведя анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 5.5 и 6.5, отметим, что несмотря на наличие слабых сторон проекта его сильные стороны имеют большее влияние на проект. Так, например, высокая цена оборудования и трудность монтажа компенсируется низкими затратами на ремонт и высокими энергетическими показателями. А такой показатель, как «Квалифицированный персонал» превалирует над «Сложностью эксплуатации электрооборудования».

5.5. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Описанные ранее методы позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного цикла нового продукта, можно предложить варианты совершенствования. Составим морфологическую матрицу для двигателя-маховика (Таблица 5.7).

Таблица 5.7 - Морфологическая матрица для двигателя-маховика

	1	2	3	4
А. Форма маховика				
Б. Материал маховика	Сталь	Алюминиевый сплав	Углепластик	Титановый сплав
В. Вид двигателя	Асинхронный двигатель	Синхронный двигатель с постоянными магнитами	Синхронный гистерезисный двигатель	Бесконтактный двигатель постоянного тока

Данная матрица показывает возможные варианты решения конструкции двигателя-маховика. Возможные варианты решения 1А2Б1В, 4А2Б1В.

Наиболее технологичное решение 2А1Б4В представляют собой двигатель-маховик, в котором маховик колокольной формы, выполненный из стали, электродвигатель БДПТ.

5.6. Планирование научно-исследовательских работ

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

5.6.1. Структура работ в рамках технического проектирования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Перечень всех этапов и работ при проектировании распределяется на исполнителей в зависимости от видов работ (Таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Поиск и изучение аналогов	2	Сбор данных для проектирования двигателя	Научный руководитель, дипломник
Расчет и выбор оборудования	3	Проектирование двигателя	Дипломник
	4	Корректировка и доработка	Дипломник
	5	Составление спецификации	Дипломник
	6	Выполнение графических работ	Дипломник
	7	Составление пояснительной записки	Дипломник
Оформление отчета по техническому проектированию	8	Проверка отчёта и графических работ, исправление ошибок	Дипломник, Научный руководитель
Сдача выпускной квалификационной работы	9	Защита работы	Дипломник, Научный руководитель

5.6.2. Определение трудоемкости выполнения ТП

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко–днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула [13]:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{min.i} + 2t_{max.i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ - ожидаемая трудоемкость выполнения i – ой работы чел. – дн.;

$t_{min.i}$ - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i – ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн. (экспертная оценка);

$t_{max.i}$ - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i – ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн. (экспертная оценка).

Таблица 5.9 –Продолжительность работ в рабочих днях

№	Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ	
		$t_{min,i}$		$t_{max,i}$		$t_{ож,i}$			
		Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник
1	Составление и утверждение технического задания	1	-	1	-	1	-	1	-
2	Сбор данных для проектирования двигателя	1	5	1	10	1	7	1	7
3	Проектирование двигателя	1	38	2	40	1,4	38,8	2	39
4	Корректировка и доработка	1	14	1	18	1	15,6	1	16
5	Составление спецификации	1	2	1	4	11	2,8	1	3
6	Выполнение графических работ	2	8	2	14	2	10,4	2	11
7	Составление	2	15	2	20	2	17	2	17

	пояснительной записки								
8	Проверка отчёта и графических работ, исправление ошибок	1	5	1	5	1	5	1	5
9	Защита работы		4	11	4	1	4	1	4

5.6.3. Разработка графика проведения технического проекта

Для наглядного построения графика проведения работ используем форму диаграммы Ганта. Это горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками. Отрезки характеризуют даты начала и конца выполнения работ. График строится для ожидаемой длительности подготовки ВКР с разбивкой по месяцам и декадам [9]. На основе таблицы 5.4 строим план – график проведения работ (таблица 5.10).

Участники проекта:

 - научный руководитель;  - дипломник.

По диаграмме видно, что продолжительность работ занимает 12,5 декад. Время выполнения технического проекта составит 102 дня. Из них 102 дня – продолжительность выполнения работ дипломника; 12 дней – продолжительность выполнения работ руководителя.


















5.6.4. Смета затрат на проект

Экономическое обоснование затрат на выполнение проекта зависит от его себестоимости. Начальные данные - план работ, перечень требуемой аппаратуры, оборудования, сырья и материалов. Затраты на проект:

$$K_{\text{п}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{з/пл}} + K_{\text{с.о}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}};$$

где $K_{\text{мат}}$ - материальные затраты; $K_{\text{з/пл}}$ - затраты на заработную плату; $K_{\text{с.о}}$ - затраты на социальные нужды; $K_{\text{пр}}$ - прочие затраты; $K_{\text{накл}}$ - накладные расходы.

Таблица 5.10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп-ли	Т _{рi} , раб. дн	Продолжительность выполнения работ												
				Февр.		Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление, утверждение ТЗ	Руководитель	1													
2	Сбор данных для проектирования двигателя	Руководитель	1													
		Дипломник	7													
3	Проектирование двигателя	Руководитель	2													
		Дипломник	39													
4	Корректировка и доработка	Руководитель	1													
		Дипломник	16													
5	Составление спецификации	Руководитель	1													
		Дипломник	3													
6	Выполнение графических работ	Руководитель	2													
		Дипломник	11													
7	Составление пояснительной записки	Руководитель	2													
		Дипломник	17													
8	Проверка и исправление ошибок	Руководитель	1													
		Дипломник	5													
9	Защита работы	Руководитель	1													
		Дипломник	4													

Материальные затраты

Материальные затраты — это величина денежных средств, потраченных на закупку материалов, используемых при разработке данного проекта.

Таблица 5.11 – Материальные затраты на выполнение ТП

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед.,руб	Затраты на материалы, руб.
Бумага для принтера	упаковка	1	300	300
Ручки, карандаши	Штук	4	30	120
Степлер	Штук	1	220	220
Скоросшиватель	Штук	1	120	120
Распечатка	Лист	120	2	240
Итого				1000

Затраты на заработанную плату

Заработная плата (оплата труда работника) - вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные выплаты (доплаты и надбавки компенсационного характера, в том числе за работу в условиях, отличающихся от нормальных, работу в особых климатических условиях и на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, и иные выплаты компенсационного характера) и стимулирующие выплаты (доплаты и надбавки стимулирующего характера, премии и иные поощрительные выплаты).

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как:

$$З_{\text{полн}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}};$$

где $З_{\text{осн}}$ - основная заработная плата, руб.;

$З_{\text{доп}}$ - дополнительная заработанная плата, руб.

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) исполнителя рассчитывается исходя из трудоемкости работ и квалифицированных исполнителей по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p;$$

где $Z_{\text{дн}}$ - среднедневная заработная плата работника, руб.;

T_p - продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{тс}} + Z_{\text{р.к.}}}{F_d};$$

где $Z_{\text{тс}}$ - заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$Z_{\text{р.к.}}$ - районная доплата, руб. для г. Томск составляет 30,2 %;

F_d - количество рабочих дней в месяце (26 при 6-дневной рабочей неделе), раб. дн.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 5.12.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}};$$

где $k_{\text{доп}}$ - коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15);

Расчёт полной заработной платы приведён в таблице 5.13.

Таблица 5.12 - Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Тарифная ставка, руб.	Районный коэффициент, руб	Месячная заработанная плата, руб	Дневная заработанная плата, руб.	Кол-во рабочих дней	Основная заработанная плата, руб
Руководитель	30000	9060	39060	1502,3	12	18027,7
Дипломник	12000	3624	15624	600,9	102	61294,2
Итого						79321,8

Таблица 5.13 - Расчёт полной заработной платы

Исполнители	Коэф. доплаты	Основная заработная плата, руб	Дополнительная заработная плата, руб	Полная заработная плата, руб
Руководитель	0,15	18027,7	2704,2	20731,9
Дипломник	0,15	61294,2	9194,1	70488,3
Итого		79321,8		91220,2

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления на социальные нужды — элемент себестоимости продукции (работ, услуг), в котором отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством нормам государственного социального страхования в Фонд социального страхования Российской Федерации, Пенсионный фонд Российской Федерации, Государственный фонд занятости населения Российской Федерации и фонды обязательного медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг) по элементу «Затраты на оплату труда» (кроме тех видов оплаты, на которые страховые взносы не начисляются).

Затраты на социальные отчисления (30% от затрат на заработную плату):

$$З_{с.о} = З_{полн} \cdot 30,2\% = 91220,2 \cdot 0,3 = 27366 \text{ руб.}$$

Затраты на накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина накладных расходов принимается в размере 16% от общей суммы затрат:

$$З_{\text{нр}} = З_{\text{полн}} \cdot 16\% = 91220,2 \cdot 0,16 = 14595,2 \text{ руб.}$$

5.7. Формирование смет затрат технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при заключении договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции.

Определение бюджета затрат на проект приведен в таблице 5.14.

Таблица 5.14 - Смета затрат технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс.руб.	Структура затрат, %
1. Материальные затраты ТП	1	0,7
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей проекта	91,23	67,98
3. Отчисления во внебюджетные фонды	27,37	20,39
4. Накладные расходы	14,6	10,88
5. Итого	134,2	100

Общая продолжительность выполнения технического проекта составила 102 рабочих дня. Составлен календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 134,2 тыс.руб, из которых более половины (67,98 %) составляют затраты на оплату труда.

5.8. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле [9]:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i;$$

где I_{pi} - интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Критерии, соответствующие требованиям к системе электроснабжения промышленных предприятий:

1. Экономичность: оптимизация затрат на электрическую часть предприятия на стадии проектирования приводит к их уменьшению на доли процентов, в абсолютном же измерении речь идет об экономии значительных средств.
2. Гибкость: возможность частых перестроек технологии производства и развития предприятия.
3. Безопасность: обеспечение безопасности работ, как для электротехнического персонала, так и для не электротехнического;
4. Обеспечение надлежащего качества электроэнергии: качество электроэнергии, удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13109-97 [15].
5. Надежность: бесперебойное снабжение электроэнергией в пределах допустимых показателей ее качества и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.
6. Простота и удобство в эксплуатации: возможность использования персоналом более доступного, автоматизированного и адаптивного по конструкции техническим характеристикам электрооборудования на предприятии.
7. Энергоэффективность: использование меньшего количества энергии для обеспечения установленного уровня потребления энергии в зданиях либо при технологических процессах на производстве.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 5.15.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности технического проекта составит:

$$I_{p1} = 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,10 + 5 \cdot 0,15 + 6 \cdot 0,18 + 5 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,07 + 4 \cdot 0,15 = 4,71$$

Таблица 5.15 - Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Экономичность	0,15	4
2. Гибкость	0,10	4
3. Безопасность	0,15	5
4. Обеспечение надлежащего качества электроэнергии	0,18	5
5. Надежность	0,20	5
6. Простота и удобство в эксплуатации	0,07	4
7. Энергоэффективность	0,15	4
Итого:	1,00	

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности и помехоустойчивости позволяют судить о надежности системы.

Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»

В результате выполнения задач по данному разделу был произведен SWOT-анализ при помощи которого, выявлены сильные и слабые стороны данного исследования. Также составлен план-график научно-технического исследования. Для иллюстрации календарного графика была использована диаграмма Ганта, обладающая высокой степенью информативности. Общая продолжительность исследования составила 102 дня. Составлена смета технического проекта, которая дает оценку первоначальной суммы затрат на реализацию технического проекта. К тому же была проведена оценка ресурсоэффективности проекта по интегральному показателю, которая показала достаточно высокий результат - 4,71. А это значит, что при реализации проект будет эффективным.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

В данном разделе ВКР проанализированы и разработаны меры по организации условий труда при выполнении работ по сборке бесконтактного двигателя постоянного тока, соответствующих правовым нормам трудового законодательства и нормативным документам.

Проект ВКР относится к средствам управления в области космонавтики, ориентации и стабилизации КА. Сущность проекта ВКР представляет собой проектирование электропривода для системы ориентации КА. Электропривод представлен двигателем-маховиком, который наиболее эффективно может быть использован в малых космических аппаратах (МКА). В настоящее время двигатели-маховики создаются на основе бесконтактных двигателей постоянного тока, обеспечивающие хорошую регулировочную характеристику в широком диапазоне угловых скоростей.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Для осуществления трудовых обязательств допускаются лица, достигшие 18-летнего возраста, прошедшие специальное обучение, медицинское освидетельствование и инструктаж по охране труда на данном рабочем месте.

Рабочие обязаны проходить периодическое медицинское освидетельствование. Лица моложе 21 года – ежегодно, старше 21 года – каждые три года. В цехе наличие укомплектованной медицинской аптечки обязательно.

Рабочие должны быть обеспечены рабочей одеждой, а также СИЗ. Для каждого рабочего выделяется шкаф для хранения рабочей одежды и СИЗ.

Рабочий обязан постоянно контролировать и поддерживать техническое исправность станков, инструментов и приспособлений.

Режим рабочего времени шестидневный с одним выходным днем согласно ст. 100 ТК РФ [13].

Персональные данные работника могут обрабатываться только в целях обеспечения соблюдения законов, нормативных правовых актов, трудоустройстве, получении образования, продвижении по службе, обеспечения личной безопасности работников, контроля выполняемой работы и обеспечения сохранности имущества. Персональные данные работника не могут передаваться третьей стороне без письменного согласия работника (ст.86, 88 ТК РФ) [13].

В процессе производства на работника могут воздействовать вредные и опасные факторы, согласно ст.147 ТК РФ [13] оплата труда на работах с вредными и (или) опасными условиями труда в повышенном размере.

Каждый работник имеет право на рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда; обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний из федерального закона об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

Производимые работы относятся к категории Па - интенсивность энергозатрат 151 — 200 ккал/ч (175 — 232 Вт), связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения [12].

6.2. Производственная безопасность

Создание условий для безопасного, комфортного труда обеспечивают высокую производительность. Поэтому необходимо проанализировать и устранить вредные и опасные факторы, что является задачей охраны труда.

Охарактеризовать рабочее место можно наличием опасных и вредных факторов, которые разделяют по группам элементов: (ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [18]).

Таблица 6.1 - Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при выполнении работ

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработ ка	Изготовл ен	Эксплуат ация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Требования к микроклимату устанавливаются СанПиН 2.2.4.548- 96 [12]. Требования к шуму в помещении устанавливаются СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [21]. Производственная вибрация устанавливается СН 2.2.4/2.1.8.566– 96 [22]. Требования к освещению устанавливаются СНиП 23-05-95 [23]. Требования к электробезопасности [24]. Требования к движущимся механизмам [25].
2. Превышение уровня шума		+	+	
3. Повышенный уровень вибрации	+	+	+	
4. Недостаточный уровень освещенности	+	+	+	
5. Электрический ток		+	+	
6.Движущиеся механизмы		+	+	

6.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов

1. Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат производственных помещений играет важную роль для здоровья работника. Он представляет собой комплекс физических факторов, которые оказывают влияние на теплообмен человека. Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару. Низкая температура воздуха может вызвать местное или общее охлаждение организма, стать причиной простудного заболевания либо обморожения. Для этого рабочие условия поддерживают в пределах гигиенических норм.

Температура воздуха — это основной фактор, определяющий метеорологические условия. Тепло в результате производственного процесса оказывает влияние на температуру воздуха в помещении. Оптимальная температура воздуха для холодного и теплого периода года имеет разные значения (Таблица 6.2). В холодный период года батареи центрального отопления поддерживают необходимую температуру воздуха.

Влажность воздуха также значительно влияет на самочувствие человека, так как от этого зависит теплообмен организма с окружающей средой. Оптимальная норма относительной влажности - (40-60) %.

Движение воздуха внутри помещения происходит при непрерывном движении (нагреве) воздушных масс в пространстве. Для осуществления организованного и контролируемого воздухообмена, обеспечивающего удаление из помещения воздуха, загрязненного пылью, парами, газами используют систему вентиляции, которая обеспечивает необходимую влажность и скорость движения воздуха.

Санитарные правила устанавливают гигиенические требования к показателям микроклимата рабочих мест с учетом интенсивности энергозатрат работающих, времени выполнения работы, периодов года и содержат требования к методам измерения и контроля условий.

Таблица 6.2 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах в цеху сборки [12]

Период года	Категория работ	Оптимальная температура, °C	Допустимая температура, °C	Оптимальная влажность, %	Допустимая влажность, %	Скорость движения воздуха оптимальная, м/с	Скорость движения воздуха допустимая, м/с
Холодный	Средней тяжести IIa	17-19	21-23	40-60	15-75	0,1	0,3
Теплый	Средней тяжести IIa	18-20	22-27	40-60	15-75	0,1	0,4

2. Превышение уровня шума.

Главными источниками шума на производстве являются производственное оборудование, а также вентиляционная система.

Звуковые колебания, создаваемые на производстве, способные оказать вредное воздействие на безопасность и здоровье работника, наиболее негативно на орган слуха человека. Звуковое давление до 40...70 дБ создает значительную нагрузку на нервную систему, которая вызывает ухудшение самочувствия и может быть причиной неврозов, свыше 75 дБ может привести к профессиональной тугоухости – потере слуха, более 140 дБ возможен разрыв барабанных перепонки, контузия, более 160 дБ и смерть. [16]

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 6.3 согласно пункту 5 СН 2.2.4/2.1.8.562–96. [21].

Таблица 6.3 – Предельно допустимые уровни шума

	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
Рабочее место	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Сборочный цех	107	95	87	82	78	85	83	81	69	80

Средства индивидуальной защиты включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

Средства коллективной защиты представлены: уменьшением шума на пути его расширения и непосредственно в источнике, организационно-техническими мерами, архитектурно-планировочными мерами

1. Повышенный уровень вибрации

Источником вибрации в цехах являются механические колебания различных станков, в результате которой происходят изменения в физиологическом и функциональном состоянии человека.

Изменения в физиологическом состоянии организма: развитие нервных заболеваний, нарушение функций сердечно-сосудистой системы, нарушения

функций опорно-двигательного аппарата, поражение мышечных тканей и суставов, нарушение функций органов внутренней секреции.

Изменения в функциональном состоянии организма: повышение утомляемости, увеличение времени двигательной и зрительной реакции, нарушение вестибулярных реакций и координации движений.

Перечисленные изменения в организме приводят к возникновению вибрационной болезни, и к снижению производительности труда.

Нормы вибрации представлены в таблице 6.4 [26].

Таблица 6.4 – Нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная частота, Гц									
	Логарифмический уровень виброскорости									
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500
Производственный цех	-	103	100	101	106	112	118	-	-	-

Для уменьшения степени воздействия вибрации на организм человека применяют средства индивидуальной и коллективной защиты:

Средства индивидуальной защиты: виброзащитная обувь, перчатки со специальными упругодемпфирующими элементами.

Коллективные средства защиты: оградительные устройства, виброизолирующие, виброгасящие и вибропоглощающие устройства, устройства дистанционного управления.

2. Недостаточный уровень освещенности

Правильно выполненная система освещения позволит снизить производственный травматизм, уменьшить потенциальную опасность многих производственных факторов, обеспечив высокую производительность.

На производстве применяются естественное освещение, которое создается солнечным излучением и искусственное, осуществляемое электрическими лампами. Естественное освещение положительно влияет на зрение, психологическое состояние и тонизирует организм человека в целом.

Освещенность на рабочем месте не должна вызывать напряжения зрения рабочего. Органы зрения утомляются от недостаточной или повышенной освещенности и неправильного направления света.

Требования к освещенности производственных помещений устанавливаются санитарными нормами СП 52.13330.2016. Нормирование производственного помещения производится в зависимости от характера зрительной работы, размера объекта и фона. При работе за компьютером освещенность помещения должна составлять 300-500 Лк, а освещенность экрана не более 300 Лк [14].

Для достижения таких требований, целесообразно использовать галогенную лампу мощностью 12 Вт, дающую освещенность в 340 Лк. Наименьший объект различия – это линии чертежа двигателя, толщина которых 0,3 мм по базовым настройкам программе КОМПАС. При выполнении работ рекомендуется комбинированное искусственное освещение, которое позволяет равно распределять свет по всей площади.

3. Электрический ток

В процессе производства возможны поражения работников электрическим током, электрической дуги. Из-за чего возникают электротравмы и профессиональные заболевания.

Степень воздействия на человека электрического тока зависит от: рода и величины напряжения и тока; частоты электрического тока; пути тока через тело человека; продолжительности воздействия электрического тока; условий внешней среды.

Действующими нормативными документами являются: ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [24], ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1) [17].

Обеспечит защиту от случайного прикосновения к токоведущим и металлическим нетокведущим частям следующие коллективные способы и средства: защитные оболочки, защитные ограждения, защитные барьеры, безопасное расположение, изоляция рабочего места, малое напряжение, защитное отключение, электрическое разделение, предупредительная сигнализация, блокировки, знаки безопасности.

В качестве индивидуальных средств защиты применяются экранирующие комплекты (костюмы, перчатки, обувь), коврики, подставки, контактные выводы и перемычки, проводники с зажимами и т.д.

4. Движущиеся механизмы

Движущиеся механизмы и их части опасны для рабочего в получении механических травм при их функционировании. Механические травмы могут быть получены в тех цехах, где используются подвижные механизмы и при проведении транспортных, монтажных операций на предприятиях.

Условия существования потенциальной опасности воздействия объекта (движущегося механизма) на человека может быть предусмотрена технологическим процессом, недостатками в монтаже и конструкции объекта, возникнуть при изменении технологического процесса и применении другого типа оборудования. Требования к минимальному расстоянию от самой крупной части тела, подверженной риску, и движущимся механизмом представлены в таблице 6.5 [27].

Таблица 6.5 - Минимальные расстояния, устраняющие защемление тела

Часть тела	Минимальное расстояние, мм
Тело	500
Голова (неблагоприятная поза)	300
Нога	180
Стопа	120
Пальцы ног	50
Рука	120
Кисть руки, сустав, кулак	100
Палец	25

6.4. Мероприятия по снижению уровня воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего)

Всем работникам предприятия необходимо пройти инструктаж по технике безопасности - вводный и первичный [20]. Повторный инструктаж проходят после вводного и первичного инструктажей через некоторый промежуток времени. Прохождение инструктажа отмечается в журнале по технике безопасности. Также перед началом работы нужно проверить исправность оборудования.

Необходимый микроклимат в помещении поддерживается с помощью систем вентиляции, теплоснабжения.

Равномерность освещения обеспечивается с помощью комбинированного освещения, светлой окраски потолка, стен и производственного оборудования.

Для уменьшения уровня шума предпринимают следующие меры: проектируют генеральный план объекта с точки зрения акустики, устанавливают звукоизоляционные ограждения, для наиболее шумных агрегатов звукоизолирующие кожухи и акустические экраны, применяют дистанционное управление, а в системах вентиляции и кондиционирования воздуха глушители шума [15, 16]. Для уменьшения влияния вибраций проектируют станки и механизмы с минимальными вибрациями; применяют специальные средства виброзащиты; оборудование виброизолируют.

Производственное помещение относится к помещениям без особой опасности поражения электрическим током согласно таблице 6.6 [28].

Таблица 6.6 – Категории помещения

Категория помещения	Проект новой редакции ПУЭ
Без повышенной опасности	>50 В перем. тока
	>120 В пост. тока
С повышенной опасностью, особо опасные наружные и электроустановки	>25 В перем. тока
	>60 В пост. тока

Для предотвращения поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям следует использовать защитное заземление.

Кожухи механизмов ограничивают доступ к движущимся механизмам. Также предохранительные устройства, предназначенные для автоматического отключения агрегатов и машин при отклонении параметров работы оборудования, служат средствами защиты от движущихся механизмов. Предохранительные устройства по характеру действия бывают блокировочными и ограничительными. К предохранительным устройствам относят ограничители хода, изготовленные в виде упоров, конечных выключателей и т. п. [27].

Выполнение требований к психологическим факторам обеспечивается возможностью периодического отдыха для снятия умственного и психологического напряжения, размеренным ритмом работ [18].

6.5. Экологическая безопасность

Эффективность мер по защите окружающей среды обеспечит комплексный подход и усилия всего человечества.

БДПТ выполняет функцию электропривода системы ориентации космического аппарата (КА). Поэтому при оценке влияния прибора на окружающую среду, можно говорить о влиянии КА на окружающую среду. На земной орбите находятся множество спутников, имеющих различный возраст и назначение, многие из которых уже не функционируют. Так как в настоящее время спутники имеют важное значение в жизни человечества, необходимо свести к минимуму их повреждение летающими обломками, а также очистить околоземное пространство от вышедших из строя спутников.

Средний жизненный цикл КА, произведенных в России, составляет 5-10 лет. По окончании срока службы спутник выводится с орбиты Земли, сгорает в атмосфере или становится космическим мусором.

Важно уделить внимание совершенствованию технологических процессов, разработке нового оборудования с меньшим уровнем выбросов и широкому применению дополнительных методов и средств защиты окружающей среды. Все еще остается актуально внедрение новых информационных технологий и преобразование информации в электронный вид, вместо бумажных носителей.

На фоне увеличения использования средств вычислительной техники возникают проблемы увеличения объема потребления электроэнергии. Это вызывает рост мощностей и количества электростанций [19].

Рост энергопотребления приводит к таким экологическим нарушениям: изменение климата - накопление углекислого газа в атмосфере; загрязнение воздушного бассейна; загрязнение водного бассейна; аварии ядерных реакторов, проблема утилизации ядерных отходов; изменение ландшафта Земли.

Меры, предпринимаемые по снижению энергопотребления:

- Поддержание оптимального значения косинуса ϕ ($\cos \phi$);
- Проверка соединений электрических цепей;
- Обеспечение бесперебойности производства;
- Оптимальная загрузка существующего оборудования;
- Контроль качества электроэнергии и др.

6.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При проектировании БДПТ наиболее вероятная ЧС — это пожар. Причинами пожара могут быть: токи короткого замыкания; электрические перегрузки; искрение в местах плохих контактов при соединении проводов; курение в неположенных местах.

Для предотвращения пожара в рабочем помещении, необходимо соблюдать, следующие технические, эксплуатационные и организационные мероприятия [20]:

- работы только при исправном электрооборудовании;
- план эвакуации из корпуса, наглядные пособия на видном месте;
- отключение питания электроприборов в отсутствии рабочих ;
- правильное содержание помещения;
- противопожарный инструктаж сотрудников;
- организация пожарных дружин, пожарнотехнических комиссий;

В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь планом эвакуации из помещения.

Правилами безопасности предусматривается заблаговременное составление на промышленных предприятиях планов предотвращения аварий, в которых устанавливаются обязанности должностных лиц предприятия на время аварийной ситуации. Планы находятся у диспетчера, главного инженера и командира подразделения спасательной службы.

Вывод по разделу

В данном разделе ВКР были проанализированы опасные и вредные факторы при исследовании и разработке электропривода для систем ориентации космического аппарата, а также методы защиты от них. Были проанализированы вопросы производственной безопасности, выявленных опасных факторов, экологической безопасности, безопасности при чрезвычайных ситуациях, а также правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. К каждому разделу прописаны нормативные документы, которыми нужно руководствоваться при эксплуатации проектируемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выпускная квалификационная работа включила в себя исследования электропривода системы ориентации космического аппарата, которая представляет собой исполнительный орган – электродвигатель-маховик, вырабатывающий кинетический момент равный 0,25 Нм и скоростью вращения маховика - 12000 об/мин. В качестве электродвигателя был выбран бесконтактный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами, рассчитаны его параметры и построены рабочие характеристики, рабочая диаграмма магнита. В качестве постоянных магнитов был выбран самарий кобальтовый сплав КС37, который подходит для эксплуатации в экстремальных условиях космоса. Двигатель потребляет ток 0,823А, полезная мощность 10 Вт, коэффициент полезного действия составил $\eta=0,6$. Конструкцию было решено выбрать с внутренним ротором. Габаритные размеры: внешний диаметр якоря 0,035м, внутренний диаметр якоря 0,025м, длина пакета якоря 0,02м, наружный диаметр индуктора 0,025м, внутренний диаметр индуктора 0,015м. Также для маховика была подобрана наиболее эргономичная форма, рассчитаны габаритные размеры маховика (наружный радиус обода – 0,039м, внутренний радиус обода 0,029, высота обода 0,0074м) и подобран материал (сталь Х12МФ).

В разделе «Социальная ответственность» проведён анализ опасных и вредных факторов, возникающих в процессе сборки двигателя. Рассмотрены вопросы техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности.

В разделе «Финансовый менеджмент» был составлен календарный план-график работ, рассчитана смета затрат на проектирование и проведена оценка технического уровня спроектированного двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладышев Г.Н., Дмитриев В.С., Копытов В.И. Системы управления космическими аппаратами. - Томск: Изд. ТПУ, 2000. - 207с.
2. Лифанов, Владимир Александрович. Расчет микромашин постоянного тока с постоянными магнитами : учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию / В. А. Лифанов, Г. Н. Мармелев; Челябинский политехнический институт. — Челябинск: Б. и., 1978. — 109 с.: ил.. — Библиогр.: с. 105-107..
3. Верещагин В.П., Вейнберг Д.М., Стома С.А. Опыт эксплуатации силовых гироскопов-гиродинов с магнитными опорами на орбитальном комплексе «Мир» // Труды ВНИИЭМ. Электромеханические устройства космических аппаратов. М., 1997. Т.97. С. 5-12.
4. Шереметьевский Н.Н. /Электромеханика и мирный космос. / Электротехника. – 1987. №6. С.10-16.
5. Гладышев Г.Н., Дмитриев В.С., Костюченко Т.Г. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов . - Томск: Изд. ТПУ, 2013. - 208с.
6. Жолдак С.А., Технология изготовления малогабаритных гиromоторов. Судпромгиз – 1961
7. ГОСТ 6636-69. Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные линейные размеры (с Изменениями N 1, 2) [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/gost-6636-69>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;
8. Криницына З.В. Ресурсоэффективность отрасли: Учебное пособие З.В.Криницына. – Томск, издательство Томского политехнического университета, 2013. – 182 с.
9. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие /Криницына З.В.,

Видяев И.Г.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

10. И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение . - Томск: Изд. ТПУ, 2014. - 36с.

11. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200006034> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. ру(1-4)

12. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/901704046>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

13. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 24 апреля 2020 года). [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/901807664/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

14. СП 52.13330.2011 – Естественное и искусственное освещение, [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200084092>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

15. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200118606>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;.

16. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация [Электронный ресурс].

<http://docs.cntd.ru/document/5200292>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

17. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1) [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/5200313/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

18. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200136071>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

19. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/5200292>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

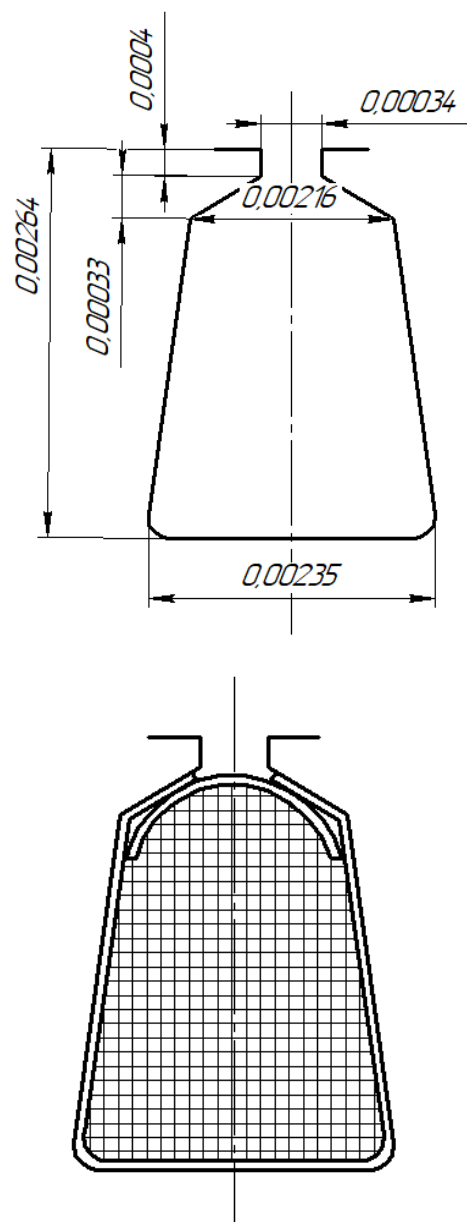
20. ГОСТ 12.0.004-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. Общие положения. [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200136072>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

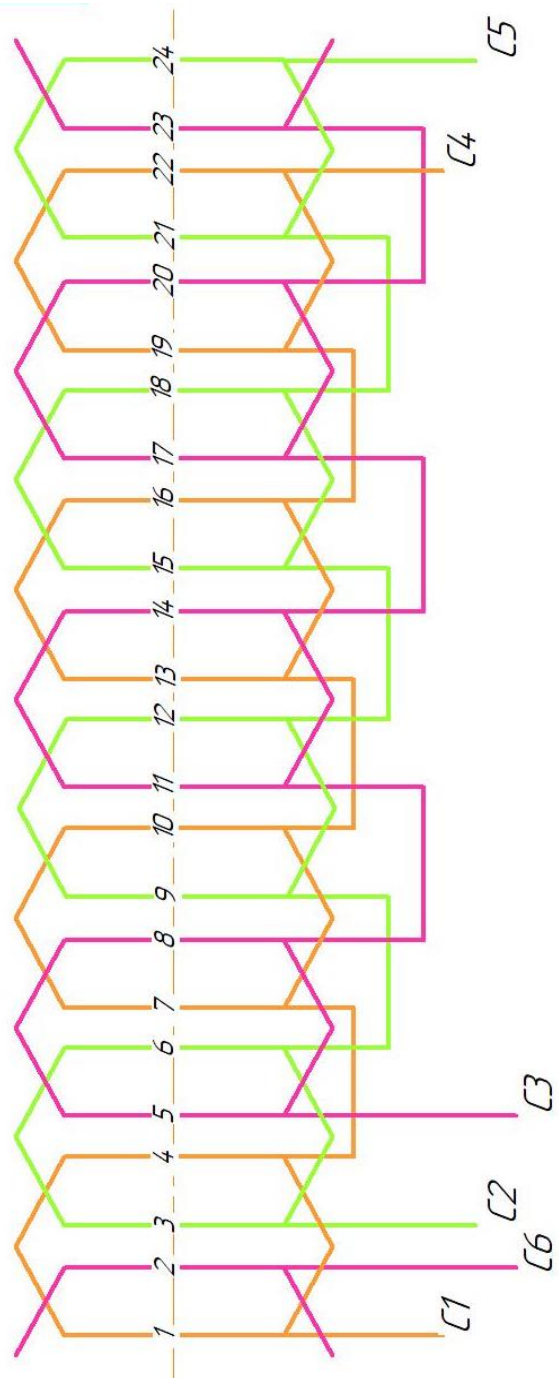
21. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/901703278>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

22. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/901703281>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;

23. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/456054197/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;
24. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200161238>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;
25. ГОСТ Р 51335-99 Безопасность машин. Минимальные расстояния для предотвращения защемления частей человеческого тела [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200025949/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;
26. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/5200329>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;.
27. ГОСТ 12.4.125-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства коллективной защиты работающих от воздействия механических факторов. Классификация [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/901702099>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;.
28. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200003114>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус;.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Паз якоря





ПРИЛОЖЕНИЕ 3 – Сборочный чертеж электродвигателя-маховика

